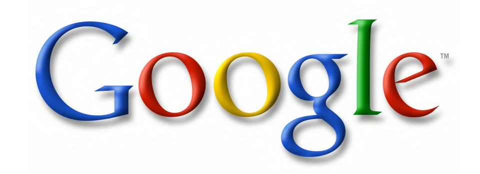
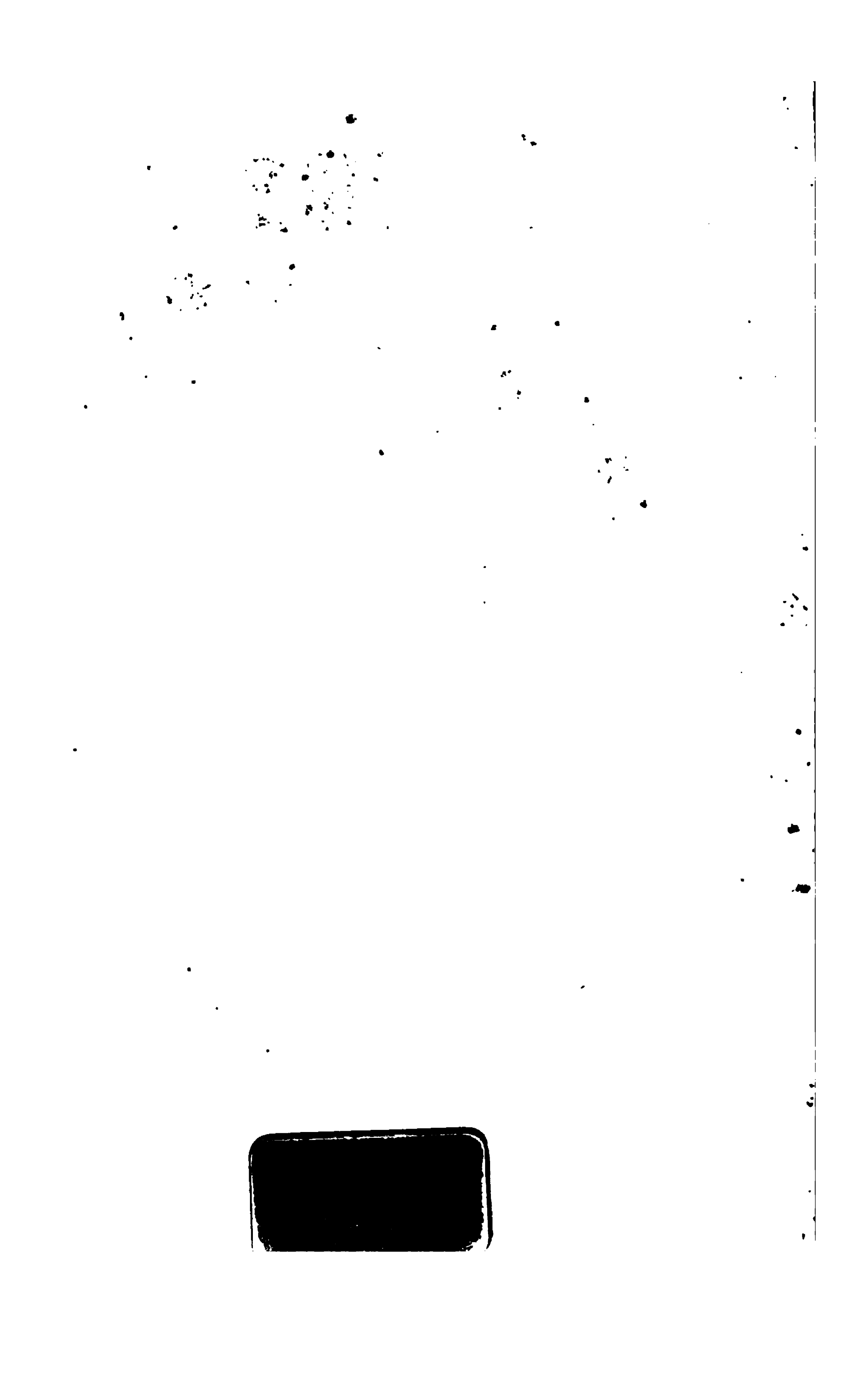

Google





PETIT TRAITÉ

DE PHYSIQUE.

PARIS. — IMPRIMERIE DE GAUTHIER-VILLARS,
Rue de Seine-Saint-Germain, 10, près l'Institut.

PETIT TRAITÉ
DE PHYSIQUE,

A L'USAGE

DES ÉTABLISSEMENTS D'INSTRUCTION,

DES ASPIRANTS AUX BACCALAURÉATS ET DES CANDIDATS AUX ÉCOLES DU GOUVERNEMENT,

PAR M. J. JAMIN,

MEMBRE DE L'INSTITUT,

Professeur à l'École Polytechnique et à la Faculté des Sciences de Paris.

ILLUSTRÉ DE 686 FIGURES DANS LE TEXTE.



PARIS,

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE IMPÉRIALE POLYTECHNIQUE,

SUCCESSEUR DE MALLET-BACHELIER,

Quai des Augustins, 55.

1870

PRÉFACE.

Depuis le commencement de ce siècle, la Physique a été renouvelée dans son ensemble. Fresnel a établi la Théorie de la Lumière, Ampère celle du Magnétisme; l'étude des vibrations sonores a été considérablement accrue; on a reconnu que l'ensemble des radiations émises par les corps échauffés se distingue par des réfrangibilités croissantes, non par des changements de nature et d'essence, et que, par conséquent, les diverses chaleurs rayonnantes, les lumières de couleurs différentes et les rayons chimiques ne sont que les notes distinctes d'une série de gammes, et ne diffèrent que par leur durée de vibration. Dans les dernières années enfin, on a démontré qu'un nombre donné de calories peut se transformer en une quantité équivalente de travail mécanique et réciproquement, et que la Chaleur, autrefois appelée *statique* et considérée comme un fluide, n'est autre chose que la somme des forces vives qui animent les molécules des corps chauffés. L'ensemble de ces remarquables progrès a fait justice d'anciennes hypothèses, et la Physique n'est plus ou ne sera bientôt plus qu'une Mécanique rationnelle où les forces naturelles exercent leur action sur les substances pesantes et sur un milieu spécial et unique, qui se nomme l'*éther*.

Cependant les Traités élémentaires semblent prendre à tâche de dissimuler ces idées générales, et de se contenter de

détails sans liaison : le Magnétisme est toujours représenté comme dépendant d'un fluide ; la Chaleur est réduite à des notions empiriques, on professe qu'elle se dissimule et devient *latente* ; la Chaleur rayonnante est prise comme distincte de la Lumière, et l'on ne dit rien de la Théorie optique.

Le Livre élémentaire que j'offre aujourd'hui au public est conçu dans un esprit différent (*). Dès les premiers mots je démontre que la Chaleur est un mouvement moléculaire, et cette idée guide ensuite le lecteur dans toutes les expériences et les explique. La terre et les aimants n'étant que des solénoïdes, je fais dépendre le Magnétisme de l'Électricité. L'Acoustique montre dans leurs détails les vibrations longitudinales, transversales, circulaires et elliptiques ; elle prépare à l'Optique. Cette dernière Partie enfin est l'étude des vibrations de toute sorte qui se produisent dans l'éther ; les interférences et la polarisation sont expliquées de la manière la plus élémentaire, et la Théorie vibratoire est rendue accessible à tous.

J'ose espérer que les modifications que je propose dans l'enseignement de la Physique seront approuvées par mes Collègues, et qu'elles seront profitables aux Élèves en les délivrant de ce que les savants ont abandonné, en élevant leur esprit jusqu'à de plus hautes conceptions, en leur montrant l'ensemble philosophique d'une science déjà très-avancée et qui semble toucher à son terme.

J. J.

(*) Je dois des remercîments à M. R. Radau, qui m'a aidé dans la préparation de cette édition.

PETIT TRAITÉ DE PHYSIQUE.

LIVRE PREMIER.

PESANTEUR, ÉLASTICITÉ.

CHAPITRE PREMIER.

EFFETS DE LA PESANTEUR ET DE LA PRESSION SUR LES SOLIDES.

I. — LOIS DE LA CHUTE DES CORPS.

La Physique étudie les propriétés générales des corps, celles de l'Électricité, du Magnétisme, de la Chaleur et de la Lumière.

Les corps sont étendus; ils sont divisibles jusqu'à une extrême limite. On admet qu'ils sont composés de *molécules :* on ne connaît point la dimension de ces molécules, on suppose qu'elles sont très-petites et séparées par des distances très-grandes relativement à leur grosseur. Elles se rapprochent ou s'écartent, suivant que l'on comprime ou qu'on dilate les corps.

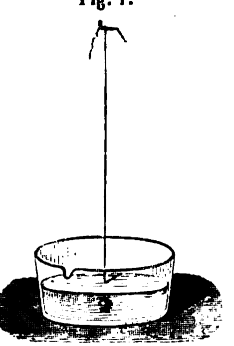
Les corps sont au *repos* lorsqu'ils ne changent pas de lieu dans l'espace; en *mouvement,* lorsque leur position, par rapport à un repère fixe, varie d'une manière continue.

La matière ne peut d'elle-même changer son état de mouvement. Toute cause qui modifie cet état se nomme *force.*

Le point sur lequel une force agit est son *point d'application.* Sa *direction* est la direction du mouvement qu'elle produit. Enfin, il faut connaître l'*intensité* d'une force; et comme on peut toujours lui faire équilibre par

un poids appliqué au même point et en direction contraire, ce poids est la mesure de son intensité. Les forces peuvent donc s'évaluer en kilogrammes à l'aide d'instruments appelés *dynamomètres*.

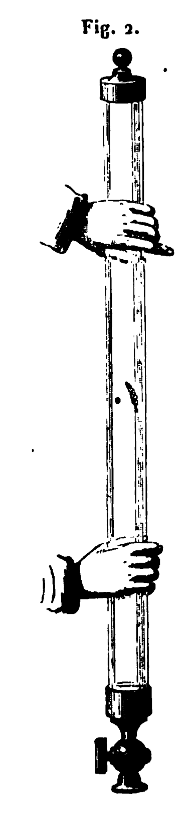
Fig. 1.



La plupart des corps que nous connaissons tombent sur le sol quand on les abandonne. Il y a donc une force qui les sollicite : c'est leur poids, et ce poids résulte d'une cause générale que l'on nomme *pesanteur*.

Quand on suspend un corps (*fig.* 1) par un de ses points extérieurs au moyen d'un fil attaché à un obstacle fixe, l'action de la pesanteur est détruite par la résistance du fil, c'est-à-dire par une force unique dirigée suivant ce fil : elle est égale et opposée à cette résistance. La direction de la pesanteur est donc celle du fil à plomb.

Fig. 2.



Si l'on plonge ce fil à plomb dans un verre plein d'eau noircie, son image réfléchie par la surface du liquide est sur le prolongement du fil, quelle que soit la position de l'observateur. On en conclut que la pesanteur est normale à la surface du liquide.

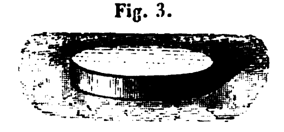
Résistance de l'air. — Nous commencerons par remarquer que si l'on fait tomber, du haut d'un édifice, du plomb, du liége, une plume, etc., ces corps arrivent en bas après des temps de plus en plus longs. C'est l'effet de la résistance que l'air oppose à leur chute.

Pour le prouver on prend un large tube de verre (*fig.* 2), long de 2 mètres environ, fermé à l'une de ses extrémités, et garni à l'autre d'une douille métallique à robinet qui peut se visser sur le bouton d'une machine pneumatique. Le tube contient des parcelles de diverses substances choisies parmi celles dont la chute libre est la plus inégale. Quand le vide est fait, on retourne le tube et on voit tomber les corps

d'ensemble, sans que l'un d'eux prenne l'avance ou reste en arrière. Si on laisse rentrer de l'air, la différence des vitesses se montre et s'accroît de plus en plus.

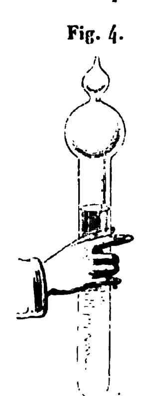
Voici encore deux expériences sur le même sujet. On prend d'abord une pièce de monnaie, et l'on taille dans une feuille de papier mince une rondelle égale en diamètre (*fig.* 3). Quand on les fait tomber séparément, on voit la rondelle marcher plus lentement que la monnaie; quand on pose le papier sur le métal et qu'on les abandonne ensemble, l'air n'agit plus sur la rondelle, qui suit le métal et prend le même mouvement que lui.

Fig. 3.



On remplit la moitié d'un tube de verre (*fig.* 4) avec de l'eau qu'on fait bouillir. Il se forme des vapeurs qui balayent le tube, et quand elles ont expulsé l'air qu'il contenait, on le ferme au chalumeau. Le tube ainsi préparé est donc vide d'air, et quand on le retourne brusquement, l'eau tombe sans rencontrer de résistance et frappe le fond avec un bruit sec, qui fait donner à l'appareil le nom de *marteau d'eau*.

Fig. 4.



Ceci s'explique aisément. Supposons qu'on prenne 1 gramme d'or et 1 gramme de liége; tous deux seront sollicités à tomber par la même force, mais le premier occupant moins d'espace que le second, sera moins retardé par l'air. Si l'on augmentait la surface de l'or en le réduisant en lames minces, on augmenterait cette résistance et on retarderait considérablement la chute.

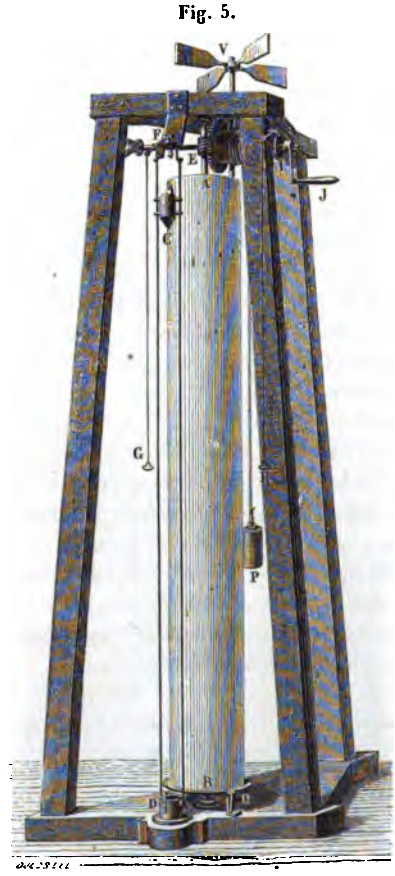
Il résulte de là qu'il faudrait chercher les lois de la chute des corps dans le vide. On s'est contenté d'opérer dans l'air, mais en choisissant des métaux très-lourds qui sont à peine retardés.

Appareil de M. Morin. — Le corps dont on veut observer la chute à l'aide de cet appareil est un poids cylindrique conique de fer C (*fig.* 5), qui tombe en glissant le long de fils métalliques tendus verticalement. Avant l'expérience, il est accroché à la pointe recourbée d'un levier F. Pour le faire tomber, on relève cette pointe en tirant le fil G; alors il parcourt toute la hauteur de l'appareil et s'enfonce à la fin de sa course dans un tube D où il reste.

Vis-à-vis, et tout près du poids, est un cylindre de sapin, couvert d'une feuille de papier, que l'on fait tourner au moyen d'une vis sans fin E, sur laquelle engrène un treuil FI sollicité par un poids P. La rotation est rendue uniforme par un régulateur à ailettes V.

Le poids C porte un crayon dont la pointe, poussée par un ressort, appuie sur le bord supérieur du cylindre; aussitôt que la chute commence, le crayon trace sur le cylindre une courbe que nous allons étudier.

Fig. 5.



Si l'on a marqué sur le cylindre une série de lignes verticales équidistantes, elles ont été rencontrées par le crayon successivement et après des temps o, 1, 2, 3,...; et les longueurs comprises entre les points de rencontre et le bord supérieur du cylindre mesurent les espaces parcourus par le mobile. Or on trouve que ces espaces sont proportionnels aux carrés 1, 4, 9,... des temps 1, 2, 3,..., et qu'en général ils peuvent se représenter par la formule

$$e = A t^2.$$

Si le temps est exprimé en secondes, A est égal à $4^m,9$. On est convenu de représenter ce coefficient par $\frac{g}{2}$; on a donc

$$e = \frac{g}{2} t^2 = 4^m,9 \times t^2.$$

La quantité g se nomme l'*accélération;* elle est égale à $9^m,8$. La formule montre qu'un corps qui tombe librement parcourt dans la première seconde $4^m,9$, dans la suivante quatre fois $4^m,9$, et ainsi de suite.

Plan incliné. — Un fil métallique (*fig.* 6), attaché à un mur en A et tendu par un poids B, passe en B sur une poulie que l'on peut élever ou abaisser, et fait avec l'horizontale un angle α qu'on varie à volonté. On pose à cheval sur le fil une poulie à chape soutenant un poids p et pouvant glisser le long de AB.

En étudiant les espaces parcourus par ce mobile pendant 1, 2, 3,... secondes, on trouve les mêmes lois que dans la chute libre, c'est-à-dire

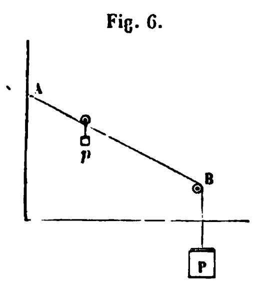


Fig. 6.

qu'on a toujours $e = \frac{g'}{2}t^2$. Seulement, g' est plus petit que g.

Si le mobile tombait librement dans l'air, il serait entraîné par son propre poids p; tombant sur le plan incliné, il n'est sollicité que par la composante parallèle au mouvement, qui est $p\sin\alpha$. Dans le premier cas, l'espace parcouru en 1 seconde était $\frac{g}{2}$, dans le second cas il est $\frac{g'}{2}$. Or, l'expérience prouve que l'on a la relation

$$\frac{g'}{g} = \sin\alpha = \frac{p\sin\alpha}{p},$$

c'est-à-dire que les accélérations sont proportionnelles aux forces qui produisent le mouvement.

Machine d'Atwood. — Sur une plate-forme (*fig.* 7) élevée de 3 mètres environ et soutenue par une colonne de bois CAD, est établie une poulie de cuivre qui est aussi légère et aussi mobile que possible. Pour augmenter sa mobilité, on fait reposer l'axe A, qui est bien poli, sur deux systèmes de roues, C et D, qui se croisent et qu'il entraîne avec lui pendant qu'il tourne. On admet que le frottement est nul et que le poids de la poulie est négligeable.

Sur la gorge de la poulie s'enroule un fil de soie qui soutient deux poids P et P': ils se font équilibre s'ils sont égaux; mais si l'un est plus fort que l'autre, il tombe de haut en bas, fait marcher le plus faible de bas en haut, et tout le système prend un mouvement commun. Dans ce cas, le poids total à entraîner est la somme de P et de P', et la force qui agit sur lui est égale à P — P'; par conséquent la différence entre la chute libre et le mouvement sur cette machine consiste en ce que, dans le premier cas, c'est le poids P + P' qui ferait mouvoir le système, et, dans le second cas, c'est la différence P — P'. Tout se réduit ainsi à avoir diminué la force dans le rapport de P — P' à P + P', rapport qui est constant pendant la durée de l'expérience. La force étant moindre, la chute est moins rapide.

Une horloge à balancier G, battant les secondes, est soutenue sur le même support. Une bascule P est disposée en haut de l'appareil pour soutenir le poids; elle est reliée à l'horloge par un levier EFG, et au moment

où l'aiguille passe au zéro du cadran, un mécanisme convenable fait jouer la bascule et commencer la chute.

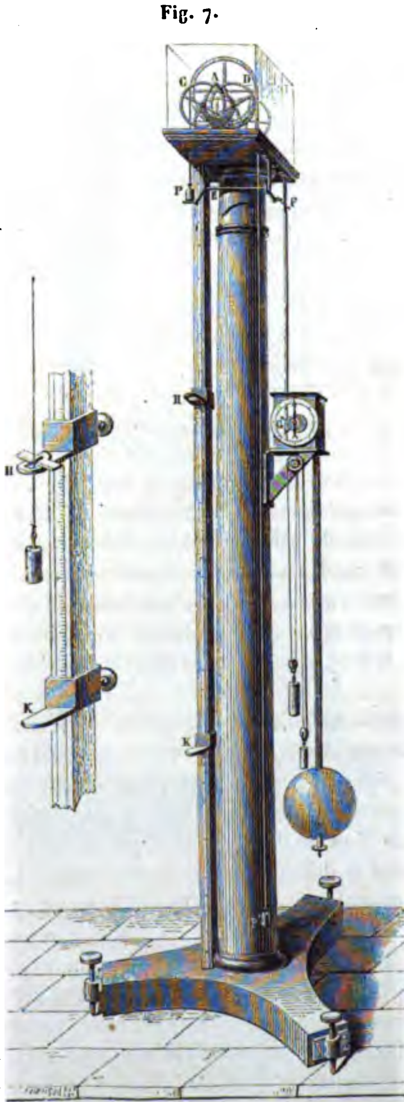


Fig. 7.

L'appareil se complète par une règle divisée HK, sur laquelle on peut disposer une plaque horizontale de cuivre K et la fixer par une vis de pression à une hauteur quelconque. Elle arrête le poids, avec un choc dont on observe l'instant. Quand on veut faire une expérience, on soutient le poids P vis-à-vis le zéro des divisions. La bascule s'abaisse par l'effet de l'échappement au premier battement du pendule, et le poids tombe jusqu'à la plaque K. On cherche la position qu'il faut donner à celle-ci pour que le choc soit entendu en même temps que le deuxième battement ; dans ce cas, la chute a duré une seconde, et l'espace parcouru est marqué sur la règle vis-à-vis de la plaque.

En cherchant de la même manière la course du mobile pendant 2, 3, 4 secondes, on trouve, par exemple :

Temps..	1^s,	2^s,	3^s,	4^s,... ;
Espaces.	10^c,	40^c,	90^c,	160^c,....

Ces espaces sont égaux à celui de la première seconde multiplié par le carré du temps exprimé en secondes, ce qui se traduit par la formule

$$e = \frac{g'}{2} t^2.$$

Chaque fois que l'on change la valeur du rapport $\frac{P - P'}{P + P'}$, on change l'intensité de la force qui agit sur le mobile. L'expérience prouve qu'on a

$$\frac{g'}{g} = \frac{P - P'}{P + P'},$$

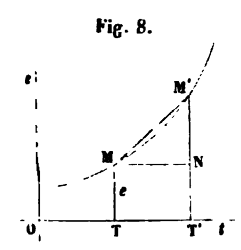
c'est-à-dire que les accélérations sont proportionnelles aux forces.

Vitesse. — On appelle mouvement *uniforme* celui d'un corps qui se meut sans accélération ni ralentissement et parcourt des distances égales dans des temps égaux. La *vitesse* v est alors l'espace parcouru pendant l'unité de temps, et l'espace e parcouru pendant un temps t est représenté par la formule

$$e = vt.$$

Mais les mouvements que nous venons d'étudier ne sont pas uniformes. ils sont *variés*; et alors la vitesse s'exprime autrement. Représentons par les ordonnées MT,... d'une courbe MM' (*fig.* 8), les espaces que parcourt le mobile, et par les abscisses OT,... les temps. Lorsque le temps croît de TT', l'espace MT augmente de la quantité M'N. Or, si l'on suppose un autre mobile parcourant le même espace M'N pendant le même temps TT', mais avec une vitesse constante, la courbe représentative de son mouvement sera la corde MM'; il aura la même vitesse moyenne que le premier mobile. A mesure qu'on diminue l'intervalle MN, le mouvement uniforme diffère de moins en moins du mouvement varié; à la limite il se confond avec lui, et sa vitesse est alors la même, c'est-à-dire qu'elle s'exprime par le rapport de l'espace parcouru M'N au temps écoulé MN. Le calcul montre que la limite de ce rapport est $g't$, lorsque l'espace MT s'exprime par $\frac{1}{2}g't^2$. On a donc (*)

Fig. 8.



$$v = g't.$$

Ce qui fait que le mouvement produit par la pesanteur s'accélère, c'est que la force ajoute constamment son effet à l'effet antérieur. Si, à un moment donné, elle était supprimée, le mobile continuerait sa route avec une vitesse constante qui serait la vitesse acquise du mobile au moment considéré. Il est facile de la calculer. En effet, les espaces parcourus au

(*) On sait que la limite de ce rapport est la dérivée de la fonction $\frac{1}{2}g't^2$, qui représente l'espace, par rapport au temps.

bout de 1, 2, 3, 4,... secondes sont égaux à 1, 4, 9, 16,... fois $\frac{1}{2}g$. En retranchant chacun de ces nombres du suivant, on trouve que les espaces franchis pendant la première, la deuxième, la troisième, la quatrième,... seconde, sont respectivement 1, 3, 5, 7,... fois $\frac{1}{2}g$. Or, l'effet de la pesanteur doit être le même pendant chaque seconde, c'est-à-dire qu'elle fait toujours franchir au mobile un espace égal à $\frac{1}{2}g$. En le retranchant des nombres ci-dessus, on trouve les espaces parcourus pendant chaque seconde en vertu de la vitesse acquise à la fin de la seconde précédente, et ces espaces sont : 0, 2, 4, 6,... fois $\frac{1}{2}g$, ou bien 0, 1, 2, 3,... fois g; ils s'expriment donc par gt. D'après notre définition, ils représentent les vitesses acquises à la fin de chaque seconde; par conséquent

$$v = gt.$$

Les deux formules

$$e = \frac{1}{2}gt^2, \quad v = gt$$

expriment donc le mouvement *uniformément accéléré* produit par une force constante, et l'on comprend maintenant pourquoi la quantité g s'appelle l'*accélération*.

La machine d'Atwood permet de vérifier l'expression des vitesses. On disposera sur la règle verticale un anneau H, à travers lequel peuvent passer les poids cylindriques; on prend un poids ascendant P' et un poids descendant égal, auquel on ajoute une lame allongée, qui détermine le mouvement et s'arrête sur l'anneau H pendant la chute. Alors le corps continue de tomber d'un mouvement uniforme, dont la vitesse est celle qu'avait le mobile en H. Plaçons, par exemple, l'anneau à 10 centimètres; si les relations des poids sont les mêmes que précédemment, cet espace sera franchi en 1 seconde. Mettons la plaque K à des distances convenables au-dessous, et cherchons les espaces parcourus au bout de 2, 3, 4,... secondes; nous trouvons

Temps..................	1^s,	2^s,	3^s,	4^s,....
Espace total parcouru.....	10^c,	30^c,	50^c,	70^c,....
Parcours après 1^s.........		20^c,	40^c,	60^c,....

Les espaces parcourus après la première seconde, quand le poids additionnel a été enlevé, sont par conséquent de 20, 40, 60,... centimètres dans 1, 2, 3,... secondes, c'est-à-dire qu'ils sont proportionnels au temps et que le mouvement est devenu uniforme. La vitesse de ce mouvement est égale à 20 centimètres : c'est la vitesse acquise à la fin de la première seconde, après un parcours de 10 centimètres; elle est double de l'espace parcouru, et s'exprimera par g' si l'on représente les 10 centimètres par $\frac{1}{2}g'$.

Pour mesurer les vitesses acquises après 2, 3, 4,... secondes de chute accélérée, il suffira de poser l'anneau à 40, 90, 160,... centimètres, et de chercher par tâtonnement l'espace que le mouvement, devenu uniforme après l'enlèvement du poids additionnel, fait franchir au mobile dans la seconde suivante. On trouve ainsi

Temps..............	1^s,	2^s,	3^s,	4^s,....,
Vitesses acquises.....	20^c,	40^c,	60^c,	80^c,....,

et, par suite, on a

$$v = g't,$$

comme nous l'avons déjà trouvé plus haut.

Masse. — Les expériences faites par le plan incliné et la machine d'Atwood ont montré que l'accélération est toujours proportionnelle à l'intensité de la force qui agit sur le mobile. Supposons que le mobile soit successivement soumis à l'effet d'un poids P et de forces quelconques P', P'',...; il prendra des mouvements représentés par les formules précédentes, et dont l'accélération sera g, g', g'',..., la première étant égale à $9^m,8$. On aura, d'après ce qui vient d'être dit,

$$\frac{P}{g} = \frac{P'}{g'} = \frac{P''}{g''} = \ldots = m,$$

c'est-à-dire que le rapport de la force qui agit sur un corps quelconque à l'accélération qu'elle lui donne est une quantité constante qui peut servir à le caractériser, et qu'on nomme sa *masse*.

Applications. — On généralise aisément les lois du mouvement produit par une force constante quelconque F. Supposons que le corps ait reçu une vitesse verticale a, et qu'il soit soumis à l'action d'une force constante quelconque agissant de haut en bas. Elle lui communiquera une vitesse Gt qui s'ajoutera à la vitesse a si celle-ci est dirigée dans le même sens, ou s'en retranchera si la vitesse a est dirigée de bas en haut. On aura donc

$$v = a \pm Gt.$$

La vitesse étant la dérivée de la fonction qui exprime les espaces parcourus, on trouvera celle-ci en repassant de la dérivée à la fonction qui l'a produite, et cela donne

$$e = at \pm \tfrac{1}{2} Gt^2,$$

en supposant nulle la distance parcourue à l'origine du temps.

La valeur de G sera donnée par les relations

$$\frac{P}{g} = \frac{F}{G}; \quad G = \frac{gF}{P} = \frac{F}{m}.$$

Si nous supposons que a soit nul, nous retrouverons les formules que l'expérience nous a données,

$$v = Gt, \quad e = \frac{Gt^2}{2},$$

et si F est égal au poids du corps, G devient égal à g, et on a les lois de la chute libre

$$v = gt, \quad e = \frac{gt^2}{2}.$$

Examinons ce qui arrive quand le corps est lancé de bas en haut et qu'il est soumis à l'action de la pesanteur

$$v = gt - a, \quad e = \frac{gt^2}{2} - at.$$

La vitesse va en diminuant avec le temps, elle devient nulle quand $t = \frac{a}{g}$, et la hauteur à laquelle parvient le mobile se trouvera en remplaçant t par cette valeur dans l'équation de l'espace, ce qui donne

$$e = \frac{g}{2}\frac{a^2}{g^2} - a\frac{a}{g} = \frac{a^2}{2g}.$$

Une fois arrivé à cette hauteur, le mobile est ramené au repos, mais alors il est soumis à l'action de la pesanteur qui le fait redescendre, et il prend un mouvement inverse dont les formules sont

$$v = gt, \quad e = \frac{gt^2}{2},$$

et quand il est revenu sur le sol d'où il est parti primitivement, il a parcouru de nouveau la hauteur $\frac{a^2}{2g}$ à laquelle il s'était élevé. Le temps qu'il a employé pour redescendre se trouvera en remplaçant e par $\frac{a^2}{2g}$ dans l'équation de l'espace, et sera $t = \frac{a}{g}$, et la vitesse qu'il a acquise est $v = g\frac{a}{g} = a$, c'est-à-dire qu'il a mis pour descendre le même temps que pour monter, et qu'il a repris en retombant au point de départ une vitesse égale à celle qu'il avait en partant, mais de signe contraire.

Plan incliné. — Si le corps tombe sur un plan faisant un angle α avec l'horizontale, l'accélération est $g \sin\alpha$, et les formules deviennent

$$v = g\sin\alpha . t, \quad e = \frac{g\sin\alpha}{2} t^2.$$

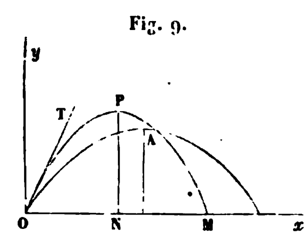
Quand le mobile partant du point A sera arrivé au point B (*fig.* 6, p. 5), il aura parcouru l'espace $AB = \frac{h}{\sin\alpha}$, en désignant par h la hauteur du plan. Si l'on remplace e par cette valeur et qu'on résolve la deuxième équation par rapport à t, on aura le temps de la chute, et la première équation donnera ensuite la vitesse acquise. On trouve

$$t = \frac{\sqrt{2gh}}{g\sin\alpha}, \quad v = \sqrt{2gh}.$$

Ceci nous montre que, si h est constant, le temps de la chute augmente quand α diminue, mais que la vitesse acquise par le mobile tombant de la hauteur h est indépendante de la direction du plan incliné, et qu'elle est la même que s'il tombait suivant la verticale.

Mouvement des projectiles. — Supposons un projectile lancé obliquement dans la direction OT (*fig.* 9), avec une vitesse initiale égale à a. Il sera soumis à deux causes de mouvement qui agiront indépendamment : la vitesse a, et l'action de la pesanteur. Cette vitesse peut se décomposer en deux autres, l'une $a\cos\alpha$ qui est horizontale, l'autre $a\sin\alpha$. Quant à la pesanteur, elle agit de haut en bas en sens inverse de $a\sin\alpha$, et produit une vitesse gt. On a

Fig. 9.



$$v_1 = a\cos\alpha,\quad v_2 = a\sin\alpha - gt$$

pour exprimer les vitesses horizontale et verticale du mobile. Les espaces parcourus se trouveront en repassant de l'expression des vitesses, qui sont des dérivées, aux fonctions dont elles dérivent, ce qui donne

$$x = at\cos\alpha,\quad y = at\sin\alpha - \frac{gt^2}{2},$$

et si l'on élimine t entre ces deux expressions, on aura l'équation de la trajectoire suivie par le mobile

$$y = x\operatorname{tang}\alpha - \frac{g}{2a^2\cos^2\alpha}x^2.$$

En remplaçant a^2 par $2gh$, h étant la hauteur à laquelle arriverait le mobile lancé verticalement avec la vitesse a, on obtient

$$y = x\operatorname{tang}\alpha - \frac{x^2}{4h\cos^2\alpha}.$$

Les projectiles lancés obliquement dans le vide doivent donc décrire une portion de parabole, et le chemin qu'ils parcourent se compose de deux parties, l'une ascendante, l'autre descendante, symétriques par rapport à l'axe vertical de la parabole.

Faisant $y = 0$, on trouve $x = 2h\sin 2\alpha$ pour l'*amplitude du jet*, c'est-à-dire pour la distance horizontale OM parcourue par le mobile. Elle devient maximum pour $\alpha = 45°$, et elle est proportionnelle à h, c'est-à-dire au carré de la vitesse initiale a.

La hauteur maximum à laquelle le mobile arrive correspondra au point N, milieu de OM ; faisons donc $x = h\sin 2\alpha$, et nous trouvons $y = h\sin^2\alpha$.

Cette hauteur maximum croît avec α et devient égale à h pour $\alpha = 90°$. On retombe dans le cas du mobile lancé verticalement de bas en haut.

Comme x est proportionnel à t, le mobile arrivera en M au bout d'un temps double de celui qu'il emploie pour aller au plus haut point P, qui correspond

au milieu de OM. Il s'ensuit que le temps qu'il emploie pour monter est égal à celui qu'il met pour descendre; ce temps est

$$\frac{a}{g}\sin\alpha.$$

II. — MOUVEMENT DU PENDULE ET MESURE DE L'ACCÉLÉRATION g.

Pour résoudre les diverses questions relatives à la pesanteur, il faut connaître l'accélération de la pesanteur, ou la quantité g. On la détermine au moyen du *pendule*.

Concevons une sphère pesante B, soutenue à un obstacle fixe par un fil pouvant se mouvoir autour d'un point d'attache : cet appareil (*fig.* 10) se tient en équilibre dans la position verticale, et quand il est écarté jusqu'en C, il est soumis aux deux composantes P′ et P″ de son poids P, l'une qui tend le fil, l'autre perpendiculaire à sa direction et qui ramène la sphère vers sa position d'équilibre B. Cette force varie à chaque instant avec la valeur de l'angle d'écartement A; elle diminue quand le mobile se rapproche de B, et devient nulle quand il atteint ce point. Elle n'est donc constante ni en grandeur ni en direction, et le mouvement qu'elle imprime se fait suivant des lois complexes qui ne sont pas celles du mouvement uniformément varié. Arrivé en B, le pendule possède une vitesse acquise, et continue sa marche sur l'arc BC′; mais le poids agissant toujours sur lui se décompose comme précédemment en deux forces, dont l'une P′, tangente à la courbe, détruit pendant la course ascendante les impulsions reçues pendant le mouvement descendant, et la sphère n'a plus aucune vitesse quand elle a parcouru l'espace BC′ = BC. Ensuite elle recommence à descendre pour remonter jusqu'en C, puis elle revient en C′; elle a donc un mouvement oscillatoire qui ne devrait jamais s'arrêter. Cependant, comme l'appareil ne pourra pas être réalisé sans qu'il y ait des frottements produits au point de suspension et des résistances opposées par l'air déplacé, on verra les amplitudes diminuer progressivement, et le pendule revenir bientôt à son équilibre.

Fig. 10.

On nomme *pendule simple* celui qui serait formé par un point matériel

pesant B, mobile en O et suspendu par un fil inextensible, rigide et sans poids. Le calcul montre que, dans ce cas fictif, la durée t d'une oscillation de C en C' est constante si A est très-petit et qu'elle est donnée par la formule

$$t = \pi\sqrt{\frac{l}{g}},$$

où l signifie la longueur du pendule.

En effet, admettons que l'angle décrit soit assez petit pour que les arcs CB, que nous désignerons par a, et EB, que nous appellerons x, puissent se confondre avec leurs cordes. On aura

$$BD = \frac{\overline{CB}^2}{2OB} = \frac{a^2}{2l}, \quad BF = \frac{\overline{EB}^2}{2l} = \frac{x^2}{2l},$$

et

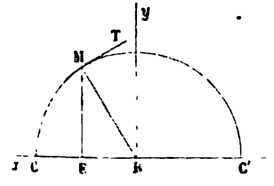
$$DF = BD - BF = \frac{a^2 - x^2}{2l};$$

par conséquent, la vitesse au point E sera

$$v = \sqrt{2g DF} = \sqrt{\frac{g}{l}(a^2 - x^2)}.$$

Développons CBC' (*fig.* 11) en une ligne droite CC' égale à $2a$; décrivons la demi-circonférence CMC' et supposons un mobile la parcourant avec une vitesse constante $a\sqrt{\frac{g}{l}}$; le temps qu'il mettra à passer de C en C' sera égal au quotient de πa divisé par cette vitesse, ou à $\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$. Arrivé en M, sa vitesse peut se décomposer en deux autres, l'une verticale et l'autre horizontale; celle-ci sera

Fig. 11.



$$a\sqrt{\frac{g}{l}}\sin EBM = a\sqrt{\frac{g}{l}}\,\frac{\sqrt{\overline{MB}^2 - \overline{EB}^2}}{MB} = \sqrt{\frac{g}{l}(a^2 - x^2)};$$

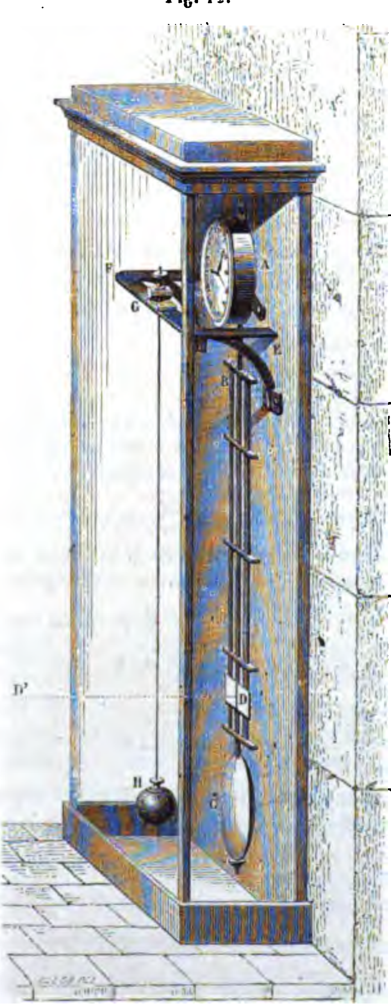
elle sera la même que celle du pendule en E. Donc il parcourra l'arc CC' dans le même temps que le mobile la demi-circonférence CMC'. Ce temps sera $t = \pi\sqrt{\frac{l}{g}}$.

Il est évident que si l'on mesure la longueur du pendule et la durée d'une oscillation, on pourra calculer g par cette formule, qui donnera $g = \frac{\pi^2 l}{t^2}$.

Il est impossible de réaliser le pendule simple. Tous ceux que nous employons peuvent être considérés comme composés d'une infinité de

pendules qui auraient leur point de suspension en O et leur extrémité en chacun des points du fil ou du poids qu'il soutient. Isolément, ils oscilleraient en des temps très-différents. Comme ils sont solidaires, ils exécuteraient un mouvement mixte. Mais la théorie mathématique montre que tout pendule composé oscille comme le fait un certain pendule simple dont on peut calculer la longueur.


Fig. 12.



Une sphère de platine suspendue en O par un fil très-fin, de manière que son centre soit à la distance l, équivaut sensiblement à un pendule simple de longueur l, et la formule s'y applique. Pour le prouver, on prend quatre sphères égales, dont on fait quatre pendules de longueurs 1, 4, 9, 16; on les écarte de la verticale et on les lâche au même instant. On trouve, au bout d'un certain temps, qu'ils ont fait respectivement, par exemple, 60, 30, 20, 15 oscillations, dont les durées relatives sont, 1, 2, 3, 4; elles sont en raison directe de la racine carrée des longueurs, ainsi que le veut la formule.

Méthode de Borda. — On a cherché de plusieurs manières à déterminer la valeur de g au moyen du pendule. Nous nous bornerons à la solution qu'a trouvée Borda. Son appareil se compose : 1° d'une horloge astronomique bien réglée A (*fig.* 12); 2° d'un support invariable de fer EGF; 3° du pendule GH, qui est placé en avant et en face de l'horloge, et suspendu par un couteau

d'acier trempé, reposant sur un plan d'agate percé d'un trou à travers lequel passe le fil; 4° d'une cage de verre qui enveloppe le tout et empêche les mouvements de l'air extérieur.

On observe les oscillations avec une lunette fixée en face de l'appareil dans la direction DD' à une distance de 8 à 10 mètres. On peut se dispenser de les compter en suivant une méthode imaginée par Borda, la *méthode des coïncidences.*

On voit passer séparément, dans le champ de vision, le balancier sur lequel on a tracé d'avance un trait vertical D, et le fil de suspension du pendule. Comme l'un des deux appareils, le pendule, par exemple, va toujours un peu plus vite que l'autre, il y a toujours un moment où tous les deux se voient superposés, ou en *coïncidence*, avec des mouvements de même sens; on le lit sur le cadran de l'horloge et on le note. Après cela le pendule prend l'avance et arrive peu à peu à repasser dans la verticale en même temps que le balancier, mais avec une vitesse inverse, et à ce moment il a fait une oscillation de plus que l'horloge; puis la différence augmentant toujours, il se fait une nouvelle coïncidence, et le pendule a fait deux oscillations de plus que l'horloge. Or, l'horloge a exécuté n oscillations, et le pendule $n+2$, dans les n secondes écoulées entre deux coïncidences; donc le temps d'une seule oscillation du pendule est $\frac{n}{n+2}$.

Variation de la constante g. — La valeur de g a été trouvée, par cette méthode, égale à $9^m,809$, à Paris et au niveau de la mer.

Nous avons admis que la pesanteur agit également sur tous les corps, c'est-à-dire que leur poids, en les faisant tomber, leur donne la même accélération. Borda a confirmé ce résultat par une épreuve décisive. En faisant osciller des sphères de diverse nature, il a reconnu que les valeurs de g ne diffèrent pas entre elles, quelle que soit la composition chimique des substances qu'il employait pour constituer le pendule.

Si dans la formule du pendule on pose $t = 1^s$, et qu'on en tire la valeur de l, on a la longueur du pendule qui bat la seconde

$$1 = \pi\sqrt{\frac{l}{g}}, \quad l = \frac{g}{\pi^2};$$

et si on la mesure en divers points du globe, on trouve

Latitude.	Longueur du pendule à secondes.	Valeur de g.
°	m	m
0	0,991 03	9,781 03
45	0,993 56	9,806 06
90	0,996 10	9,831 09

Ces nombres sont représentés par les formules générales suivantes :

$$l = 0^{m},993\,562 - 0^{m},002\,536.\cos 2\lambda$$

et

$$g = 9^{m},806\,056 - 0^{m},025\,028.\cos 2\lambda,$$

en désignant par λ la latitude. Elles prouvent que l, et par suite l'accélération, diminuent du pôle à l'équateur, ce qui tient et à la forme de la terre, qui est aplatie aux pôles, et à la force centrifuge, qui, à l'équateur, se retranche de la pesanteur.

Il y a encore une cause qui change la valeur de g : c'est la hauteur de la station au-dessus du niveau de la mer, ou ce qu'on nomme *l'altitude*. Il est, en effet, évident qu'en s'éloignant du centre de la terre la pesanteur décroît suivant la loi de l'attraction. Si R est le rayon terrestre, h l'altitude, la valeur de g devient g_1, et l'on a

$$\frac{g_1}{g} = \frac{R^2}{(R+h)^2},$$

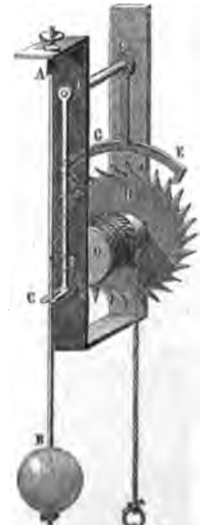
ou approximativement

$$g_1 = g\left(1 - \frac{2h}{R}\right).$$

C'est au moyen de cette relation que l'on trouvera g au niveau de la mer, quand on a mesuré g_1 à une altitude connue.

Application aux horloges. — Puisque les durées des oscillations d'un pendule dont la longueur est constante restent invariables, on peut les faire servir à la mesure du temps : toutes les horloges sont fondées là-dessus. Un treuil porte une corde enroulée, à laquelle est attaché un poids P qui tend à fair tourner l'appareil. D'autre part, un pendule suspendu en A (*fig.* 13) par une lame flexible entraîne dans ses oscillations une tige DC et aussi un arc de cercle GE ; il se termine par des pointes recourbées qui s'engagent dans une roue à dents inclinées fixée au treuil. Quand le pendule marche et que la pointe E se relève, elle abandonne la roue dentée qui tourne : mais aussitôt la pointe opposée s'abaisse, s'engage dans les dents et arrête la roue ; à l'oscillation suivante elle se relève à son tour, mais E descend vers la roue et s'engage, non point dans la même échancrure, mais dans la suivante, et pour chaque oscillation double la roue tourne d'une dent. Dès lors le treuil marche d'un angle égal à chaque oscillation, et s'il porte une aiguille, elle décrit sur un cadran des espaces égaux en des temps égaux ; il suffit donc de combiner les rouages avec

Fig. 13.



la longueur du pendule pour mesurer le temps en secondes. On remarquera, de plus, que la disposition des dents et de la pointe E est telle, que celle-ci reçoive une impulsion de la roue dentée à chaque fois qu'elle quitte une dent ; cette impulsion se transmet au pendule et l'empêche de s'arrêter.

III. — POIDS, CENTRE DE GRAVITÉ, BALANCE.

Poids. — Tout corps peut être décomposé en parties égales assez petites pour être considérées comme des points et qu'on nomme *points matériels;* elles pèsent, c'est-à-dire sont sollicitées par des forces parallèles et égales. Celles-ci se composent, suivant les lois de la statique, en une résultante unique égale à leur somme : c'est le poids du corps.

Poids spécifique. — Le poids P d'une substance homogène varie proportionnellement à son volume V. On peut donc écrire

(1) $$P = Vp \quad \text{et} \quad \frac{P}{V} = p.$$

p est ce qu'on nomme le *poids spécifique* ou la *densité* du corps (*). C'est le poids d'un volume égal à l'unité ; il est constant pour une même substance, quand elle reste à la même température ; il varie d'un corps à l'autre. C'est donc un des éléments qui caractérisent les divers corps.

1 centimètre cube d'eau à 4 degrés pèse 1 gramme, il s'ensuit que le poids P' d'un volume V d'eau à 4 degrés est exprimé en grammes par le même nombre que le volume V en centimètres cubes, et la formule précédente devient dans ce cas

(2) $$P' = V.$$

On voit que le poids spécifique de l'eau est égal à l'unité.

En divisant l'équation (1) par (2), on trouve

$$\frac{P}{P'} = p,$$

c'est-à-dire que le poids spécifique (ou la densité) d'un corps est égal au rapport de son poids à celui d'un égal volume d'eau à 4 degrés.

Centre de gravité. — La résultante de la pesanteur, le poids, passe par

(*) En Mécanique on distingue entre le *poids spécifique*, qui est le poids de l'unité de volume, et la *densité*, qui est la masse de l'unité de volume; mais dans les usages de la Physique les deux mots ont exactement la même signification.

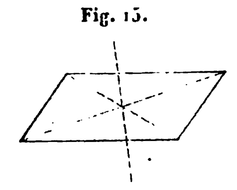
un point d'application unique qu'on nomme *centre de gravité*. On peut trouver, par l'expérience, la position du centre de gravité d'un corps. Il suffit de le suspendre à un fil (*fig.* 14), et, quand il est au repos, la verticale du fil prolongé passe par le centre de gravité. Si l'on répète la même expérience en changeant le point de suspension, la nouvelle direction du fil passant encore par le centre de gravité, celui-ci se trouve à l'intersection des deux lignes.

Fig. 14.

Il est à remarquer que si l'on fixe le centre de gravité d'un corps, on détruit l'effet de son poids, quelle que soit son orientation. De là cette définition pratique du centre de gravité : c'est le point sur lequel le corps se tient en équilibre dans toutes ses positions.

Position et propriétés du centre de gravité. — On peut, quand le corps a une forme géométrique, trouver le centre de gravité par des considérations très-simples. Dans un *cercle* ou une *sphère*, il est évidemment au centre de figure ; dans une *ligne droite*, il est en son milieu ; dans un *rectangle*, il est à l'intersection des diagonales. Si le corps a un plan de symétrie ou un axe de symétrie, le centre de gravité est dans ce plan ou sur cet axe.

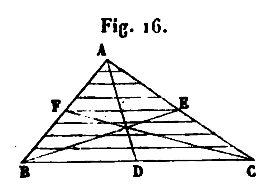
Fig. 15.



Un *parallélogramme* (*fig.* 15) a son centre de gravité au point de rencontre des diagonales ; car toute ligne droite que l'on mène par ce point partage le parallélogramme en deux moitiés égales : il sera donc en équilibre sur toutes ces lignes, et, par suite, aussi sur leur point d'intersection.

Pour trouver le centre de gravité d'un *triangle* (*fig.* 16), nous observerons que la médiane AD divise en deux moitiés égales toutes les lignes parallèles à la base BC. Les molécules situées sur une quelconque de ces lignes seront donc en équilibre sur le point d'intersection de cette ligne avec AD ; par conséquent, le triangle entier sera en équilibre s'il s'appuie sur AD, et il s'ensuit que son centre de gravité doit se trouver sur cette ligne. Le même raisonnement s'appliquant aux deux autres médianes BE et CF, le centre de gravité sera à leur point d'intersection, ou au tiers de l'une d'elles à partir de la base.

Fig. 16.

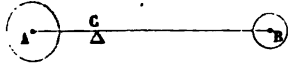


S'il s'agit d'une *pyramide triangulaire* (*fig.* 17) nous observerons que toutes les sections parallèles à la base ABC sont semblables à celle-ci et que la ligne DE qui joint le sommet D au centre de gravité E du triangle ABC passe par les centres de gravité de toutes ces sections parallèles. Par conséquent, si la ligne DE était fixée, chacune de ces sections serait en équilibre sur un point de DE, et, par suite, la pyramide entière se maintiendrait en équilibre. Elle serait également en équilibre sur chacune des lignes qui joignent les sommets A, B, C aux centres de gravité des faces opposées; le centre de gravité de la pyramide est donc au point de concours des quatre transversales, ou au quart de chacune d'elles à partir de la base.

Fig. 17.

Le centre de gravité d'un système de deux sphères réunies par une tige inflexible (*fig.* 18) et dont on peut négliger le poids se trouve sur cette tige en un point C tel, que les distances AC. BC des deux centres soient en raison inverse des poids des deux boules.

Fig. 18.



Quand un corps n'est soutenu que par un de ses points, il faut, pour qu'il soit en équilibre, que son centre de gravité se trouve sur la verticale qui passe par ce point. Dans ce cas, en effet, la force qui tend à faire tomber le corps passe par le point fixe et se trouve détruite par la résistance de l'obstacle appliqué à ce point. C'est sur cette observation qu'est fondé le procédé que nous avons indiqué plus haut pour déterminer le centre de gravité d'un corps quelconque.

Lorsqu'un corps repose sur un plan horizontal par plusieurs de ses points (*fig.* 19 et 20), il faut, pour l'équilibre, que la verticale du centre de gravité tombe dans l'intérieur du polygone formé par ses points; si elle passe en dehors de ce polygone, qu'on appelle la *base de sustentation*, le poids du corps le fait basculer. Car il faut que la résultante des résistances

Fig. 19.

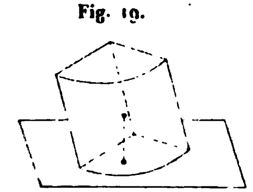
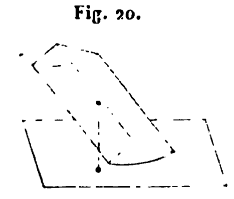


Fig. 20.



verticales, qui est située à l'intérieur du polygone d'appui, détruise le poids du corps et par conséquent passe par le centre de gravité.

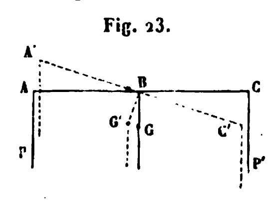
Pour qu'un homme se tienne en équilibre, il faut que la verticale qui passe par son centre de gravité tombe dans le polygone qui circonscrit ses pieds. S'il est chargé d'un fardeau, il doit changer de position pour rétablir l'équilibre; ainsi, lorsqu'il porte le fardeau sur son dos, il se penchera en avant.

Si un corps est soutenu en son centre de gravité, il se trouvera en équilibre dans toutes les positions qu'on lui donnera; c'est ce qui arrive, par exemple, pour une roue dont l'axe de rotation passe exactement par son centre de gravité. On dit alors que l'équilibre est *indifférent*. L'équilibre est *stable*, lorsque le poids du corps le ramène dans la position d'équilibre lorsqu'il en a été légèrement écarté; cela arrivera toujours quand le centre de gravité sera situé au-dessous du point d'appui ou de suspension (*fig.* 21), car la pesanteur tend toujours à l'amener dans la position la plus basse possible. Pour la même raison, l'équilibre sera *instable* lorsque le centre de gravité se trouvera au-dessus du point d'appui (*fig.* 22); dans ce cas, le moindre dérangement permettra à la gravité d'entraîner le corps du côté vers lequel il inclinera.

Fig. 21. Fig. 22.

Balance. — La balance est destinée à évaluer en grammes les poids des corps. Elle est constituée par un fléau métallique allongé, mobile autour d'un axe B (*fig.* 23), qui supporte à ses deux extrémités deux plateaux de même poids, dans lesquels on place les corps que l'on veut comparer. Quand ils sont vides, le fléau se met en équilibre au moment où son centre de gravité G est dans le vertical de l'axe de suspension; il est alors à peu près horizontal.

Fig. 23.



Supposons que les trois points A, B, C soient en ligne droite et cherchons les conditions auxquelles la balance doit satisfaire.

1° *Égalité des bras de levier.* Si AB et BC sont rigoureusement égaux entre eux, l'équilibre primitif persistera ou sera rompu, lorsqu'on chargera les bassins de poids égaux ou inégaux, et, réciproquement, on conclura l'égalité ou l'inégalité de ces poids, si cet équilibre se maintient ou se détruit.

2° *Équilibre stable.* Si le levier AC était suspendu par son centre de

gravité même, il se tiendrait en équilibre indifférent étant chargé de poids égaux, et verserait du côté le plus lourd, quelque petite que fût la différence des poids; on ne pourrait tirer parti de l'appareil. Si ce centre de gravité était *au-dessus* de B, l'équilibre serait toujours instable.

Ne pouvant être en B ni au-dessus de B il faut donc que G soit *au-dessous*. Alors la balance est bonne; car étant également chargée à ses extrémités elle se met en équilibre stable et y revient par une suite d'oscillations si on la dévie.

3° *Condition de sensibilité*. Quand on place des poids inégaux dans les bassins, leur différence agit pour incliner AC en A'C' et relever le centre de gravité en G' jusqu'au moment où le poids du fléau, appliqué en G', fait équilibre à cette différence. Pour que la balance soit sensible, il faut que le fléau s'incline beaucoup pour une très-petite différence entre les deux poids. Or il s'inclinera d'autant plus que le bras de levier BG, à l'extrémité duquel agit le poids du fléau, sera plus petit; par conséquent, la sensibilité sera d'autant plus grande que le centre de gravité G sera plus rapproché de l'axe de suspension B.

Voici dès lors les règles pour la fabrication d'une balance juste et sensible. Il faut :

1° Faire les deux bras du levier parfaitemeut égaux;

2° Établir en ligne droite les axes de suspension du fléau et des plateaux,

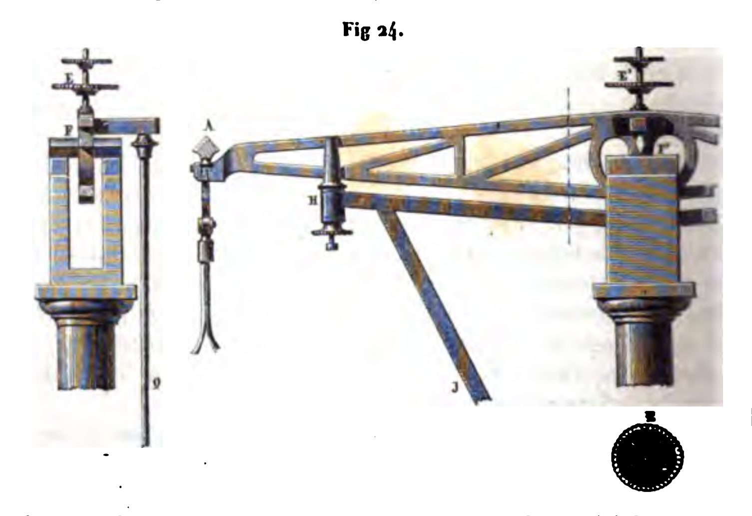
3° Donner une grande longueur au fléau, tout en réduisant son poids;

4° Placer le centre de gravité au-dessous et très-près du point de suspension.

Description d'une balance précise. — Pour réaliser ces conditions on taille le fléau dans une règle plate de bronze ou d'acier (*fig.* 24). On lui donne une longueur de 60 centimètres environ et une épaisseur de 5 millimètres; il a la forme d'un losange allongé et tronqué, évidé par de larges entailles, qui ne laissent subsister que les côtés du losange soutenus par des supports transverses. Pour réaliser mécaniquement les axes de suspension, Fortin imagina d'encastrer dans le fléau un prisme d'acier trempé F dont l'arête inférieure, bien rectiligne, pose sur un plan poli d'acier ou d'agate. Aux extrémités du fléau deux autres prismes U, dont les arêtes tranchantes sont placées vers le haut, servent à supporter des plans d'acier mobiles A auxquels sont suspendus les plateaux. Les axes de suspension sont donc représentés par les arêtes de ces trois prismes. Ce sont elles qu'il faut aligner pour placer en ligne droite les points de suspension, et ce sont les distances des arêtes extrêmes à celle du milieu qu'il faut rendre égales pour obtenir deux bras de levier égaux.

Pour placer le centre de gravité du fléau au-dessous du point de suspension et tout près de lui, on a fixé au milieu du fléau une vis à pas très-serrés, sur laquelle se meuvent deux boutons filetés E, taillés en écrous.

Fig 24.



Quand on les abaisse ou qu'on les monte, le centre de gravité descend ou s'élève, et on parvient ainsi à donner à la balance la sensibilité voulue.

Pour reconnaître le moment où le fléau est horizontal, il porte une aiguille verticale d'acier Q (*fig.* 25) qui oscille vis-à-vis une lame d'ivoire G divisée en parties égales. Quand la balance est vide, on règle les vis calantes, de manière à placer l'extrémité de l'aiguille indicatrice au zéro de la division : c'est le point de départ, et pour peu que le fléau s'incline sur sa position primitive, l'aiguille se meut sur le limbe. Étant très-longue, elle accuse évidemment les moindres déplacements.

Toute la balance repose sur un pied de fonte LMN, à vis calantes V, V'. Du centre de ce pied s'élève une colonne de laiton DC, qui porte le plan d'acier sur lequel repose le couteau central F. Une fourchette HIJ dont les bras embrassent le fléau peut se soulever et s'abaisser par le moyen d'une crémaillère cachée dans la colonne et d'un pignon denté qu'on manœuvre par un bouton extérieur O. En tournant celui-ci, on soulève la fourchette qui saisit le fléau entre ses bras H, I et le soutient fixement ; en le tournant en sens inverse, on descend la fourchette qui dépose doucement le couteau sur le plan d'acier et abandonne le fléau à l'action des poids qui le sollicitent. De plus, on enferme la balance dans une cage de verre qui repose sur le pied de l'instrument. Ainsi l'on évite les

courants d'air, l'action de l'humidité sur les corps que l'on pèse, en même temps que l'on soustrait à toute cause de détérioration l'instrument délicat qui doit toujours être prêt à servir.

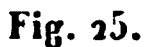
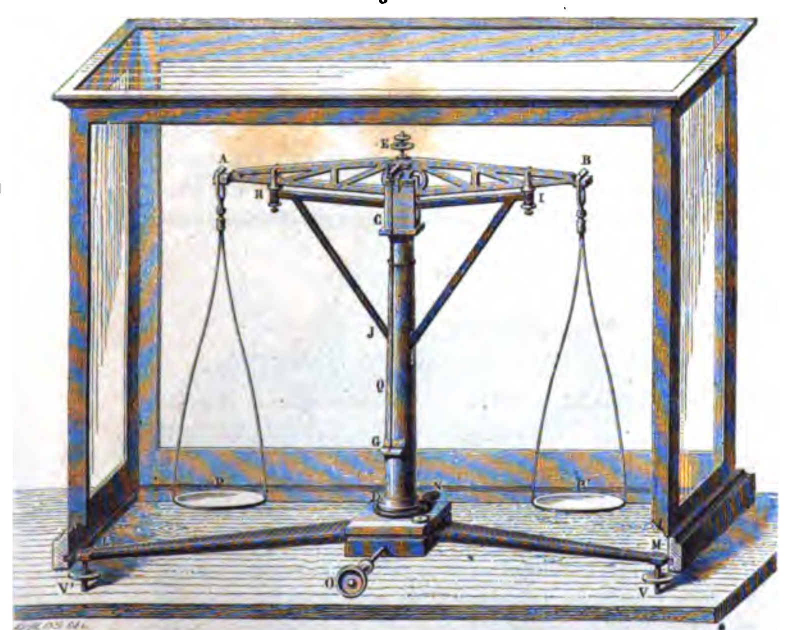


Fig. 25.



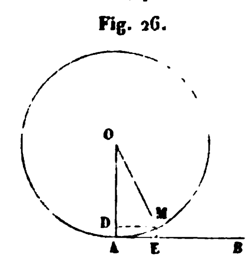
Doubles pesées. — Comme il est impossible de rendre rigoureusement égaux les deux bras du levier, on corrige l'effet de leur inégalité par la méthode de Borda, dite des *doubles pesées*. On dépose dans l'un des plateaux le corps à peser, et on l'équilibre exactement avec de la grenaille ; ensuite on le remplace par des poids notés jusqu'à reproduire l'équilibre, et il est évident que ces poids lui sont équivalents.

IV. — IDENTITÉ DE LA PESANTEUR ET DE L'ATTRACTION UNIVERSELLE.

Avant de traiter la question de l'attraction, nous allons commencer par chercher les lois du mouvement d'un corps sur un cercle.

Mouvement circulaire uniforme. — Je suppose un mobile A (*fig.* 26) de masse m, pouvant décrire un cercle autour du point O auquel il est lié par un fil, et ayant reçu à l'origine une vitesse v dirigée suivant AB; au bout d'un temps infiniment petit t, il est arrivé en M, il a décrit un arc que l'on peut confondre avec sa corde et puisqu'il n'a pas suivi la direction AB, c'est qu'il a été sollicité par une force qui lui aurait fait parcourir l'espace AD pendant que la vitesse initiale lui aurait fait franchir AE. Or cette force pouvant être regardée comme constante en grandeur et en direction pendant le temps infiniment petit t, on a

Fig. 26.



$$AD = \frac{1}{2} f t^2,$$

en désignant par f l'accélération; d'autre part on a

$$AE = vt,$$

et en remplaçant AE et AD par leurs valeurs dans la relation

$$\overline{AE}^2 = 2R \times AD,$$

il vient

$$f = \frac{v^2}{R}.$$

f est exprimé en mètres : c'est l'accélération due à la force qui a sollicité le corps. Pour avoir la mesure F de cette force en kilogrammes, il faut multiplier f par la masse, et l'on a

$$F = \frac{mv^2}{R};$$

d'où il résulte que pendant la durée du mouvement le fil tirera le mobile vers le centre avec une force $\frac{mv^2}{R}$, c'est la force *centripète* ou l'*attraction ;* ce fil sera tendu, et par conséquent le mobile tirera à l'autre bout avec une force égale et opposée qui agit sur O, c'est la *force centrifuge*.

En remarquant que la circonférence entière $2\pi R$ est parcourue avec la vitesse v en un temps T et qu'elle est égale à vT, on peut remplacer v par sa valeur $\frac{2\pi R}{T}$, ce qui donne une seconde expression de la force centrifuge

$$f = \frac{4\pi^2 R}{T^2}, \quad F = \frac{4\pi^2 R m}{T^2}.$$

On démontre l'existence de cette force au moyen d'expériences fort simples. Un petit sceau, soutenu à un fil par son anse, peut être rempli d'eau. Si on le fait tourner rapidement dans un plan vertical, il ne laissera tomber aucune portion de liquide, car celui-ci pressera contre le fond du vase avec une force normale au cercle parcouru et supérieure à son poids.

Il existe aussi des appareils qui peuvent mesurer cette force. On fait tourner autour d'un axe vertical EF (*fig.* 27) un rectangle TABU, dont le

Fig. 27.



côté TU est une tige cylindrique de laiton, enfilée dans une sphère S, dont le poids est P. Entre elle et l'arrêt N est interposé un dynamomètre R. Bientôt, la sphère comprime le ressort jusqu'à un degré fixe ; alors elle décrit un cercle, et exerce sur le dynamomètre une pression F qui mesure la force centrifuge, et qu'on peut lire sur l'instrument. On a

$$F = \frac{mv^2}{R} = \frac{Pv^2}{gR},$$

c'est-à-dire que la force motrice est proportionnelle au poids du corps qui tourne. On le démontre en remplaçant la tige TU par un tube de verre fermé,

contenant de l'air, de l'eau, un morceau de liége et une balle de plomb. on voit alors l'air rester au centre, l'eau se rendre aux extrémités du tube. puis le liége se placer à la surface de l'eau, et enfin le plomb s'éloigner jusqu'au bout du tube.

Attraction universelle. — Ces principes étant posés, cherchons les causes de la chute des corps. Tous les corps étant pesants, on admet que la masse terrestre exerce sur les objets placés à sa surface une attraction toujours sensiblement dirigée vers le centre, et qui se fait sentir encore au-dessus du sol à une hauteur quelconque. Par induction, on est conduit à supposer qu'elle s'étend au delà des limites que nous pouvons atteindre et qu'elle exerce sur les astres eux-mêmes une action réelle, mais qui décroît à mesure qu'ils sont plus éloignés.

D'un autre côté, il est probable que tous les astres offrent des phénomènes anologues, qu'il y a une pesanteur à leur surface, qu'elle est dirigée vers leur centre, et qu'elle agit à une distance quelconque sur tous les autres corps célestes. C'est en se laissant guider par ces inductions que Newton fut conduit à penser que les astres s'attirent entre eux, et que le monde est régi par des forces provenant d'une cause unique, l'attraction.

Si cela est ainsi, les planètes doivent éprouver des mouvements extrêmement complexes, parce que chacune d'elles obéit à l'influence de tous les astres. Cependant il est facile de voir que la question se réduit à une simplicité inattendue, parce que les étoiles fixes sont placées à des distances tellement grandes que leur action peut être négligée. En deuxième lieu, nous voyons que le Soleil, étant incomparablement plus gros que les planètes, doit avoir dans le système une influence prépondérante, tellement qu'une planète comme la Terre éprouve du Soleil une attraction très-grande et des autres planètes une attraction négligeable. Nous sommes ainsi conduits à considérer le Soleil comme un centre unique d'action, et les planètes comme autant de corps indépendants les uns des autres et se mouvant suivant les mêmes lois que si chacun d'eux existait seul en présence du Soleil.

Lois de Kepler. — Kepler a déduit de l'observation le mouvement de chaque planète autour du Soleil considéré comme fixe, et le résultat général de ses recherches se résume dans ces trois lois :

1° Les planètes suivent des courbes planes, et les rayons vecteurs, partant du centre du Soleil, décrivent des aires proportionnelles aux temps;

2° Les orbites des planètes sont des ellipses dont le Soleil occupe un des foyers;

3° Les carrés des temps de révolution des diverses planètes sont proportionnels aux cubes des grands axes de leurs orbites.

Lois de l'attraction. — Soient O (*fig.* 28) le centre du Soleil et A celui d'une planète à un moment déterminé. Pendant un temps très-court, elle décrit l'arc AB, et si aucune cause n'agissait sur elle, elle décrirait, dans le temps suivant et égal au premier, un arc BC égal à AB et situé sur son prolongement. Mais il n'en est pas ainsi, elle décrit BD; elle est donc soumise à une force qui agit à chaque instant sur elle pour la dévier : il s'agit d'en trouver la direction. Or, d'après la première loi de Kepler, on doit avoir

Fig. 28.

$$\text{OBD} = \text{OAB} = \text{OBC};$$

les deux triangles OBD, OBC étant équivalents, ont leurs sommets D et C sur une ligne DC parallèle à OB, et si nous achevons le parallélogramme EBCD, nous voyons que, pour parcourir l'espace BD, la planète a été soumise à sa vitesse initiale qui l'aurait transportée de B en C, et à une force qui lui aurait fait franchir la ligne BE; donc cette force est dirigée vers le centre du Soleil : Newton la nomme *attraction*.

L'excentricité des orbites planétaires étant toujours très-petite, nous pouvons, dans une première approximation, admettre qu'elle est nulle et supposer que les courbes décrites sont des cercles dont le Soleil occupe le centre. Les secteurs décrits dans des temps égaux devant être égaux, les arcs parcourus le seront aussi, et la vitesse sera constante pendant toute la révolution. Nous tombons dans le cas du mouvement circulaire uniforme étudié précédemment, et l'attraction est sa force centripète. Alors l'accélération sera $G = \frac{4\pi^2 R}{T^2}$; R représentant la distance de la planète au Soleil et T le temps d'une révolution.

En vertu de la troisième loi de Kepler, le rapport de T^2 à R^3 est une quantité constante pour toutes les planètes; en appelant K cette constante, on a $K = \frac{T^2}{R^3}$, et en multipliant cette équation par la précédente, on trouve

$$G = \frac{4\pi^2}{K} \frac{1}{R^2},$$

ce qui montre que l'*accélération de la force attractive du Soleil est la même pour toutes les planètes, et en raison inverse du carré de la distance.*

Si nous voulons avoir la force motrice A, il faut multiplier G par la masse m de la planète, ce qui donne $A = mG$; et comme G est la somme des attractions de tous les éléments du Soleil, elle est proportionnelle à la masse tout entière M de cet astre ; on peut donc poser

$$G = \frac{Mf}{R^2}, \quad A = \frac{mMf}{R^2}.$$

f est l'attraction exercée par l'unité de masse sur l'unité de masse à l'unité de distance. En résumé, l'attraction est proportionnelle au produit des masses en présence, et en raison inverse du carré des distances.

Une fois que l'on a montré l'existence et trouvé les lois de la variation de cette force, on peut se demander comment les planètes en sont venues à décrire autour du Soleil les courbes que Kepler a étudiées. Si, à l'origine des temps, la Terre, par exemple, avait été placée sans vitesse initiale en présence du Soleil également immobile, les deux astres en s'attirant auraient marché l'un vers l'autre jusqu'à se rencontrer. Mais si la Terre avait reçu une impulsion initiale dans une autre direction que la ligne des centres, elle aurait décrit une courbe sous la double influence de sa vitesse première et de l'attraction solaire. Le calcul montre que cette courbe est toujours une section conique, et le Soleil un des foyers de cette courbe ; et, suivant les valeurs de la vitesse initiale, la section conique peut être un cercle, une ellipse, une hyperbole ou une parabole. Une fois placé sur cette courbe, l'astre la suit indéfiniment, revenant sans cesse dans le même chemin, si la courbe est fermée, comme c'est le cas des planètes, et s'éloignant pour ne jamais revenir, si c'est une parabole ou une hyperbole ; il y a des comètes qui sont dans ce cas.

Identité de la pesanteur et de l'attraction universelle. — Newton a démontré, comme il suit, que la cause qui fait tomber les corps sur le globe est la même que l'*attraction*.

La distance R des centres de la Lune et de la Terre est égale à 60 fois le rayon moyen r de la Terre. Astronomiquement parlant, cette distance est fort petite, ce qui fait que l'attraction de la Terre sur la Lune est beaucoup plus grande que celle du Soleil et que l'on peut la considérer comme l'action unique à laquelle la Lune soit soumise. Il en résulte que la Lune doit décrire et décrit, en effet, une ellipse autour de la Terre considérée comme immobile. Admettons que cette ellipse soit un cercle et que la Terre

soit sphérique aussi bien que la Lune; cela n'est point vrai à la rigueur, mais c'est une approximation dont nous pouvons d'abord nous contenter.

L'accélération g de la pesanteur est le résultat de l'attraction de la masse terrestre agissant à une distance du centre égale au rayon r de la Terre. Or le centre de la Lune étant à la distance $R = 60r$, l'accélération de la pesanteur doit y être plus petite et égale à g divisé par le carré de 60. D'un autre côté, cette accélération doit être représentée, comme pour toutes les planètes, par $\frac{4\pi^2 R}{T^2}$, et en égalant les deux expressions, on devra avoir

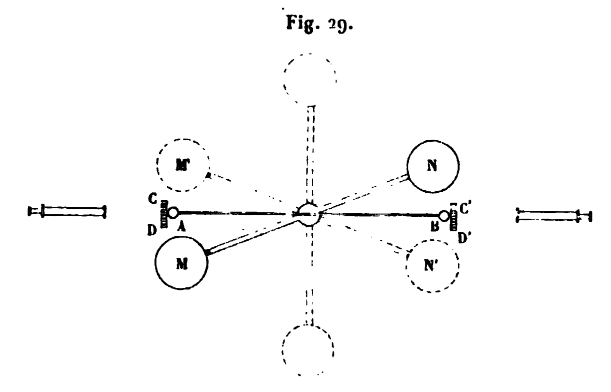
$$\frac{g}{60^2} = \frac{4\pi^2}{T^2} R.$$

Or, en faisant le calcul, c'est-à-dire en remplaçant R et T par leurs valeurs, on trouve pour la valeur de g le nombre $9^m,7$, ce qui est, avec autant d'exactitude qu'on pouvait l'espérer, la valeur de l'accélération produite par la pesanteur. On peut en conclure l'identité de la cause qui fait tomber les corps et qui retient la Lune dans son orbite.

Expériences de Cavendish. — Cavendish a démontré que l'attraction s'exerce réellement à la surface de la Terre.

Un levier de sapin AB (*fig.* 29), léger et bien homogène, est soutenu par

Fig. 29.



son milieu à un fil métallique fin, fixé par le haut au plafond d'une chambre fermée; aux deux extrémités du levier sont suspendues des balles identiques A et B, et deux lames d'ivoire CD, C'D' qui portent des divisions équidistantes. Ce fléau suspendu est entouré d'une boîte d'acajou qui le préserve des agitations de l'air et dont les extrémités, fermées par des glaces, laissent voir les divisions de CD et de C'D'; on les observe au moyen de lunettes à réticules, enchâssées dans le mur de la chambre, et l'on suit de l'extérieur tous les mouvements du levier.

Deux grosses sphères de plomb M et N, qui pèsent chacune 158 kilogrammes sont soutenues par une règle tournante; on les fait mouvoir de l'extérieur sans entrer dans la chambre. Quand ces sphères sont mises dans la direction perpendiculaire à AB, elles n'agissent point, et l'observateur détermine la position d'équilibre des mires; après quoi il dirige les sphères en MN. A ce moment M attire A, N attire B, le fil se tord, le levier se déplace et atteint une deuxième position d'équilibre quand l'attraction de M sur A et de N sur B égale la force de réaction du fil, force que l'on a déterminée par des expériences préalables. Après cela, on fait une seconde observation en retournant les grosses sphères en M'N', et l'on prend les moyennes.

La force attractive des sphères étant ainsi connue pour une distance déterminée, on peut la calculer pour l'unité de distance; et en la divisant par le poids de ces sphères, on trouve l'attraction φ que l'unité de poids exerce sur la balle A à l'unité de distance. D'un autre côté, l'attraction de la Terre sur cette balle A est égale à son poids p pour une distance égale au rayon terrestre r, elle serait pr^2 à l'unité de distance, et $\frac{pr^2}{M}$ pour l'unité de poids, en désignant par M le poids de la Terre. Or, il faut que l'on ait $\varphi = \frac{pr^2}{M}$; cette relation permet de calculer M, et comme $M = \frac{4}{3}\pi r^3 D$, on peut obtenir la densité moyenne D de la Terre. Cavendish a trouvé 5,48; Baily a obtenu depuis 5,67. En moyenne, la Terre est donc $5\frac{1}{2}$ fois plus dense que l'eau.

V. — ACTION ET RÉACTION, CHOC DES CORPS.

Non-seulement le Soleil attire la Terre, mais la Terre aussi attire le Soleil; c'est une loi générale, qu'à toute action correspond une réaction, comme nous allons le démontrer.

Supposons deux corps occupant chacun une position déterminée, et imaginons qu'il y ait entre eux un ressort tendu et appliqué à leurs centres de gravité; il exercera sur tous les deux des pressions égales dans des sens opposés. Si l'un des corps devient libre, il se mettra en mouvement sous l'action de la force qui lui est appliquée; si c'est l'autre, il se mouvra en sens inverse sous l'influence d'une force égale; et s'il arrive que tous les deux soient libres à la fois, tous les deux obéiront en même temps à ces deux forces égales et opposées. La même chose aura lieu si le ressort, au lieu de les pousser, les tire; il n'y aura rien de changé que le sens des effets produits. De ces deux forces, l'une est l'action, l'autre est la réaction. Nous allons montrer qu'elles se retrouvent dans tous les phénomènes de même ordre.

Plaçons verticalement sur une table un cylindre creux plein d'air et en-

fonçons un piston dans l'intérieur; l'air se comprimera et exercera deux pressions égales et opposées, l'une sur le piston de bas en haut, l'autre sur la base du cylindre de haut en bas; si nous cessons de maintenir le piston, il se relèvera; si nous enlevons la table qui soutient le cylindre, il s'abaissera brusquement. Il y avait donc un ressort tendu, c'était l'air comprimé qui exerçait une action et une réaction sur les faces opposées du cylindre et du piston. Le même phénomène se produit dans les armes à feu : l'inflammation de la poudre développe rapidement une grande quantité de gaz dans l'intérieur du canon; le boulet est chassé d'une part : c'est l'action; l'arme est repoussée de l'autre, elle recule : c'est la réaction. Au lieu d'un gaz, nous pouvons enfermer dans le cylindre creux un liquide quelconque; le piston s'y enfonce encore quand on le pousse, le liquide s'y comprime, puis il exerce une action et une réaction sur le piston et la base du cylindre.

Prenons maintenant une table chargée de poids; les pieds de la table interposés entre le sol et les poids se raccourcissent d'une quantité que l'on peut mesurer, ou se fléchissent s'ils sont courbes : c'est-à-dire qu'ils passent à l'état de tension, et leur élasticité, comme celle d'un ressort, produit deux forces égales et opposées, l'une soutenant les poids, l'autre appuyant sur le sol.

La même chose a lieu si on soutient un poids à un crochet, par l'intermédiaire d'une corde ou d'un fil de métal; ce soutien s'allonge, ses molécules s'écartent, et alors une force attractive, qui se développe entre elles, agit aux deux extrémités, d'une part pour soutenir et équilibrer le poids, de l'autre pour tirer sur le crochet, comme si le corps suspendu y était directement appliqué.

Dans le mouvement d'un corps sur un cercle le fil est tendu; il y a une force centripète qui maintient le corps à une même distance du centre, une force centrifuge qui tire sur ce centre.

Nous pouvons encore citer les actions développées par les animaux. Qu'un homme soulève un fardeau placé sur le sol, il développe une force verticale appliquée de bas en haut contre le poids qu'il soulève, mais aussi une réaction égale et dirigée en sens opposé sur le sol qui lui sert d'appui. Pour déplacer un obstacle pesant, ou vaincre des résistances, ou soutenir même le poids de notre corps, il faut, comme on le dit vulgairement, prendre un *point d'appui*, c'est-à-dire tendre nos muscles qui font ressort entre l'objet que nous voulons faire mouvoir et un obstacle résistant contre lequel se fait la réaction et qui la détruit.

Dans tous ces phénomènes, on voit donc une action dans un sens sur un des corps, une réaction opposée sur l'autre, et on en reconnaît la cause en

étudiant l'organe mécanique qui les lie; qu'il soit gazeux, liquide ou solide, c'est son élasticité qui est en jeu, et il constitue un véritable ressort, agissant à ses deux extrémités.

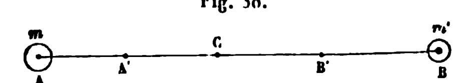
Mais il y a dans la Physique des forces qui paraissent s'exercer sans aucun intermédiaire, ou qui agissent sans qu'on le connaisse : telles sont les attractions et les répulsions magnétiques ou électriques. Mais bien qu'on ne voie alors aucun lien entre les corps attirés ou repoussés, on n'en constate pas moins l'existence des deux forces opposées. Par exemple, l'aimant attire le fer, mais aussi le fer attire l'aimant; si l'un d'eux est fixe, l'autre se met en mouvement; quand tous les deux sont libres, tous les deux se déplacent, et font, pour se rencontrer, une partie du chemin qui les sépare. De plus, les deux attractions sont égales, car si l'on fixe les deux corps sur un liége flottant, leur système ne se déplace pas de lui-même, ce qui arriverait infailliblement si l'une des deux attractions n'était pas égale à l'autre.

Puisque dans tous les cas où les expériences directes sont possibles, l'existence des deux forces d'action et de réaction se constate, qu'il y ait ou non un lien matériel pour les expliquer, on est conduit à penser qu'il en est encore de même quand il s'agit d'actions qu'on ne peut étudier par l'expérience. On admet que si le Soleil attire la Terre, la Terre attire aussi le Soleil; et que, si un corps tombe sur la Terre, celle-ci de son côté tombe vers le corps : on généralise, on étend à tous les cas possibles ce que l'on reconnaît vrai dans tous les cas particuliers, et on énonce le principe suivant :

Quand un point matériel A *est sollicité par une force émanant d'un autre point matériel* B, *ce dernier est également soumis à l'action d'une force égale et contraire à la première.*

Cette loi conduit immédiatement à des conséquences importantes. Soient deux sphères, A et B (*fig.* 30), de masse m et m', sollicitées par deux forces constantes, égales et opposées, appliquées à leur centre et dirigées l'une suivant AB, l'autre suivant BA. Toutes deux prendront un mouvement uniformément accéléré, et les accélérations seront

Fig. 30.



$$G = \frac{F}{m}, \quad G' = \frac{F}{m'},$$

d'où il suit que *les vitesses, au bout de temps égaux, seront en raison inverse des masses:*

Cette loi explique comment un boulet sort du canon avec une vitesse très-grande, pendant que la pièce dont la masse est bien plus considérable en a pris une autre beaucoup moindre, et comment la terre, dont la masse est infinie, comparée à celle des corps qui sont à sa surface, ne monte pas vers eux quand ils tombent sur elle.

Des équations précédentes on tire $mG = m'G'$; c'est ce que l'on exprime en disant que *les quantités de mouvement sont égales pour les deux corps.*

Soit C (*fig.* 30) le centre de gravité du système des deux masses A et B à l'origine du mouvement; après un temps t, elles sont venues se placer l'une en A', l'autre en B', et l'on peut voir que le centre de gravité est resté immobile : en effet, on a

$$\frac{AC}{CB} = \frac{m'}{m}.$$

Les équations du mouvement donnent

$$AA' = \frac{G}{2}t^2 = \frac{F}{2m}t^2, \quad BB' = \frac{G'}{2}t^2 = \frac{F}{2m'}t^2;$$

donc

$$\frac{AA'}{BB'} = \frac{m'}{m},$$

par conséquent

$$\frac{AC}{CB} = \frac{AA'}{BB'} = \frac{A'C}{CB'} = \frac{m'}{m},$$

donc *le point* C *est, à un moment quelconque, le centre de gravité des deux corps, et il reste immobile.*

Il résulte de là que, si une pièce de canon et le boulet qu'elle lance étaient libres de toute résistance, leur centre de gravité commun resterait indéfiniment le même. Cette conséquence se généralise en Mécanique : une bombe dont le centre de gravité décrit une parabole dans le vide, éclatant pendant sa course, se divise en divers fragments, dont le centre de gravité commun continue la parabole.

Choc des corps. — Si les deux masses m, m' ont reçu des vitesses v, v' dirigées toutes deux de A vers B, et que v soit plus grand que v', les corps arriveront à se rencontrer, seront pendant un temps très-court pressés l'un contre l'autre, et une force réciproque agira entre eux pour augmenter la vitesse de B d'une quantité x', et diminuer celle de A d'une quantité x; ces quantités seront en raison inverse des masses m', m, et nous aurons $mx = m'x'$. Si les deux corps ne sont pas élastiques, ils resteront déformés, ne se sépareront pas et continueront leur marche avec une vitesse commune $v - x = v' + x'$. On tire de ces deux équations les valeurs de x et de x', et celle de la vitesse commune des deux masses réunies, laquelle est

$$\frac{mv + m'v'}{m + m'}.$$

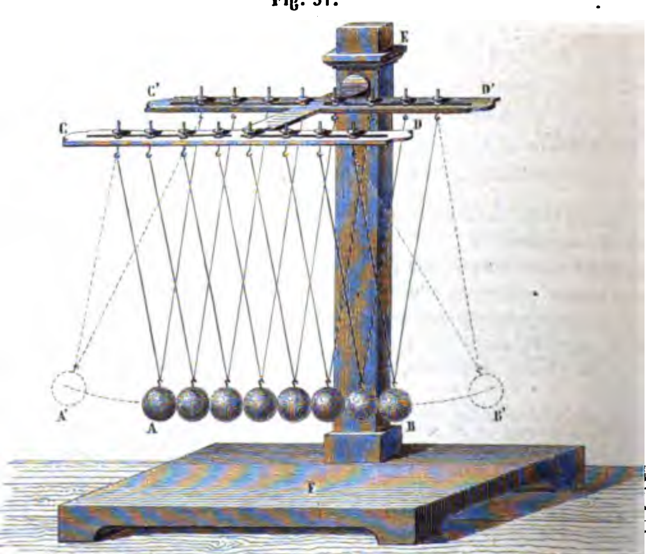
Si les vitesses v, v' sont de directions opposées, il faut, dans cette formule, écrire $- m'v'$ à la place de $m'v'$.

Si les deux corps sont élastiques, le résultat sera différent. Ils se comprimeront au moment du choc, mais reprendront aussitôt leur forme primitive. La masse m, après avoir perdu la vitesse x, recevra par la réaction élastique une autre vitesse x en sens inverse; elle aura donc finalement une vitesse $v - 2x$. De même, la masse m' aura gagné une vitesse $v' + 2x'$; et en substituant pour x et x' les valeurs déterminées précédemment, on trouve que les vitesses définitives de m et de m' sont respectivement

$$\frac{2m'v' + v(m - m')}{m + m'} \quad \text{et} \quad \frac{2mv + v'(m' - m)}{m + m'}.$$

En supposant les masses égales, ces deux expressions deviennent simplement v' et v, c'est-à-dire que les corps *ont échangé leurs vitesses* après le choc. Si la sphère B est primitivement en repos, on a $v' = 0$, et la bille choquante reste en repos pendant que la bille choquée prend la vitesse de la première. Ce résultat se vérifie aisément par l'expérience. On suspend à un support commun (*fig.* 31)

Fig. 31.



plusieurs billes d'ivoire égales, en contact et rangées en ligne droite; on écarte la première d'un angle quelconque et la laisse retomber. Elle vient choquer la bille suivante, puis elle reste en repos, en cédant toute sa vitesse à la deuxième bille, qui la transmet à la troisième, et ce jeu, se continuant jusqu'à la sphère B, celle-ci se soulève et retombe ensuite avec la même vitesse qu'avait d'abord la sphère A. Cette vitesse retourne alors jusqu'à la première bille, qui se soulève de nouveau, et l'on a ainsi un pendule formé de parties intermédiaires immobiles et de deux billes extrêmes qui seules oscillent.

Quand une bille vient frapper un obstacle B de masse très-grande, on a $v'=0$, et l'on peut supposer $\frac{m}{m'}=0$; les vitesses définitives sont alors $-v$ et zéro, c'est-à-dire que la bille reçoit, après le choc, une vitesse égale et contraire à celle qu'elle avait. Ainsi, par exemple, une bille d'ivoire qu'on laisse tomber sur un plan de marbre rebondit et remonte jusqu'au point d'où elle est tombée, retombe, remonte, et ainsi de suite. Mais ce mouvement finit par s'éteindre, parce que l'élasticité n'est jamais parfaite, et parce que la résistance de l'obstacle n'est pas infinie.

Enfin, si la bille vient frapper obliquement le plan résistant, sa vitesse se décompose en deux autres, l'une tangentielle, l'autre normale, qui seule change de signe; il en résulte une vitesse finale faisant avec le plan un angle de réflexion égal à l'angle d'incidence. C'est sur cette réflexion du choc que repose le jeu de billard.

VI. — LOIS DE L'ÉLASTICITÉ DANS LES SOLIDES.

Toutes les fois que l'on comprime un corps solide, les molécules se rapprochent, mais alors elles se repoussent et reprennent leur volume primitif quand la compression cesse. Toute action qui, au contraire, tend à les écarter, détermine entre elles une force attractive qui agit pour les ramener à leur position première. Ces forces attractives ou répulsives se nomment *forces d'élasticité*. Nous allons étudier quelques-uns de leurs effets.

Admettons, par exemple, un cylindre reposant sur un plan invariable; nous pouvons le considérer comme formé par la superposition d'assises horizontales de molécules AB, A'B' (*fig.* 32), séparées par des intervalles très-petits. Plaçons sur AB un poids très-fort; il poussera AB vers A'B', diminuera la distance de ces couches, et fera naître entre elles une force répulsive qui finira par devenir égale au poids P; elle s'exercera de bas en haut sur AB pour équilibrer P, et de haut en bas sur A'B', qui se trouvera dans les mêmes conditions que si le poids était directement placé sur la surface. A'B' agira ensuite sur la tranche suivante comme AB sur elle, et la pression se transmettra de proche en proche jusqu'au plan qui soutient le cylindre. Il y aura eu dès lors un rapprochement égal de toutes les couches, et par suite une diminution de longueur du cylindre qui sera proportionnelle au nombre des assises, c'est-à-dire à la longueur totale; ce rapprochement aura déterminé entre chaque couche CD et C'D' une

Fig. 32.



force répulsive égale au poids superposé. Si, au lieu de supposer un cy-lindre pressé, nous avions pris comme exemple une règle fixée par une extrémité et tirée par l'autre, les distances des assises voisines auraient augmenté au lieu de diminuer; elles se seraient attirées au lieu de se repousser, et l'équilibre eût été atteint quand la force attractive serait devenue égale au poids tenseur. Les actions de compression et de traction sur un cylindre développent donc deux phénomènes distincts, une diminution ou une augmentation de longueur, et entre deux couches de molécules une réaction égale au poids qui presse ou qui tire. Mais aussitôt que l'effort extérieur cesse d'agir, les forces intérieures tendent à ramener les molécules à leur place primitive. Cette tendance des corps à revenir à la forme première se nomme *élasticité*. C'est à elle qu'ils doivent d'exécuter les oscillations qui produisent les sons; c'est elle qui transmet les forces dans les machines et qui détermine les déformations que subissent les matériaux dans les constructions.

Fig. 33.



Traction. — Les expériences sur la trac[tion] se font au moyen d'une potence de fer D (*fig.* 3[3]) scellée dans un mur et terminée par un é[tau] dans lequel on serre l'extrémité supérieure de la verge que l'on veut étirer. On saisit l'extrémité inférieure dans un second étau D, au-quel est suspendue une forte caisse EHH, dans laquelle on place des poids par rangées horizontales. On commence par un poids initial suffisant pour tendre la verge, et on y ajoute ensuite des charges successives, les seules dont [on] tiendra compte et dont on mesurera l'effet. [On] observe l'allongement avec un cathétomètre.

Ces expériences montrent que l'allongement d'une barre est proportionnel : 1° au poids tenseur P; 2° à la longueur l de la barre; 3° en raison inverse de sa section s; 4° en raison inverse d'un coefficient Q variable avec la substance, et qu'on nomme *coefficient d'élasticité*. Ces lois se résument par la formule

$$\varepsilon = \frac{1}{Q}\frac{Pl}{s}.$$

Voici les coefficients d'élasticité de quelques métaux recuits à diverses températures. On suppose P exprimé en kilogrammes, l en mètres, s en millimètres carrés. La quantité $\frac{1}{Q}$ représente l'allongement ou le raccourcissement d'une barre de longueur et de section égales à l'unité, tirée ou comprimée par un poids égal à 1 kilogramme; on peut l'appeler le *coefficient de compressibilité linéaire*.

Coefficients d'élasticité.

	15° à 20°.	100°.	200°.
Plomb	1727	1630	»
Or	5584	5408	5482
Argent	7140	7274	6374
Cuivre	10519	9827	7862
Platine	15518	14178	12964
Fer	20794	21877	17700
Acier fondu	19561	19014	17926
Acier anglais	17278	21292	19278

Si un solide est pressé par tous les points de sa surface, de manière que chaque unité de surface supporte un poids P, son volume V diminue d'une quantité α, et on a

$$\alpha = CVP.$$

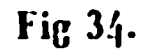
C est le *coefficient de compressibilité cubique*. D'après Wertheim, il est égal à $\frac{1}{Q}$.

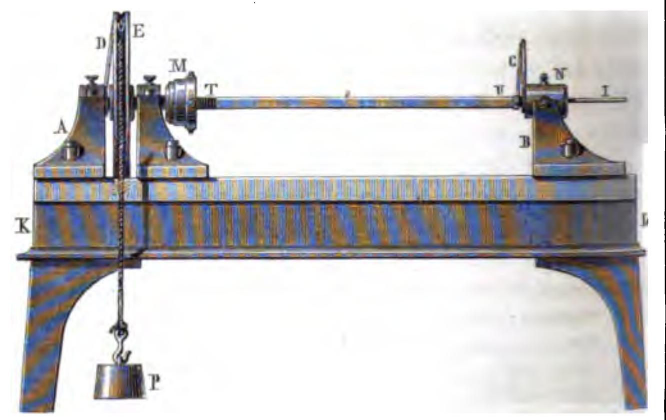
Élasticité de torsion. — Si l'on fixe un fil ou une verge élastique par un bout et qu'on le torde par un couple égal à P à l'autre extrémité, on développe dans le fil un couple de réaction qui augmente avec l'angle dont le fil a été tordu. Ces deux couples se font finalement équilibre; on les confond sous le nom de *couple de torsion*.

Les lois de la torsion peuvent être étudiées avec l'appareil de Wertheim (*fig.* 34). Sur un banc de fonte sont disposées deux poupées; l'une B peut glisser sur le banc et sert à encastrer fixement l'extrémité U de la verge que l'on veut essayer. L'autre bout T de la verge est saisi dans un axe creux M, qui tourne entre des colliers horizontaux et qui porte une poulie E sur laquelle s'enroule une corde tirée par le poids P. Ce poids agissant à l'extrémité du rayon de la poulie constitue le couple de torsion; il fait tourner la verge d'un angle ω qu'on mesure par l'index D.

En faisant varier le couple de torsion ainsi que les dimensions des verges, on a trouvé que l'angle de torsion ω est proportionnel: 1° à un

coefficient T qui varie avec la substance ; 2° au couple de torsion ou poids P ; 3° à la longueur l de la barre ; 4° en raison inverse de la quatriè

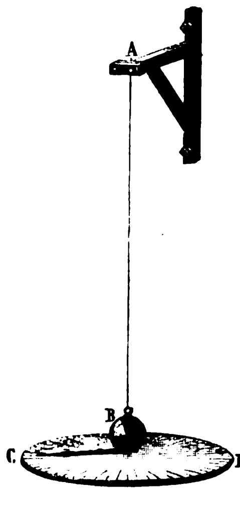

Fig 34.



puissance de son rayon r, si elle est cylindrique. Ces lois se résument p la formule $\omega = T\,\frac{Pl}{r^4}$.

Mais ce procédé ne peut s'appliquer lorsqu'il s'agit de fils très Dans ce cas, on emploie la méthode de Co lomb. On soutient par le fil AB (*fig.* 35 poids B et on le fait tourner d'un angle ω. A le fil tend à revenir à sa position d'équilibre, détord, ramène le poids avec une vitesse cr sante jusqu'à sa position primitive, la dépa avec une vitesse décroissante et se tord en s inverse d'une quantité égale ; il se détord de n veau, et ainsi de suite. On obtient ainsi oscillations dont les amplitudes décroissent p à peu à cause des frottements ou de la rés tance de l'air. L'expérience prouve que la duré de ces oscillations est constante, quel que l'angle de torsion, lors même qu'il embrasse plusieurs circonférences.

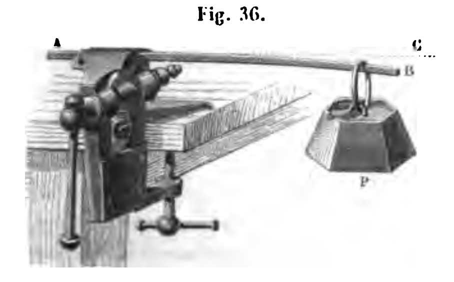
Fig. 35.



Connaissant cette durée, on peut calculer force de torsion, et l'on trouve alors que la for mule précédente se vérifie encore.

Élasticité de flexion. — Quand une barre AB est fixée par une de ses extrémités dans un étau (*fig.* 36), et qu'on applique un poids à son extrémité libre B, elle se fléchit et prend une forme courbe, puis elle reste immobile; à ce moment, la réaction de la verge fait équilibre au poids P. Quand la verge est un prisme de longueur l, d'épaisseur verticale c et de largeur b, la flexion α est proportionnelle au poids P, au cube de la longueur, et en raison inverse de la largeur, du cube de l'épaisseur et d'un coefficient F qui dépend de la substance :

Fig. 36.

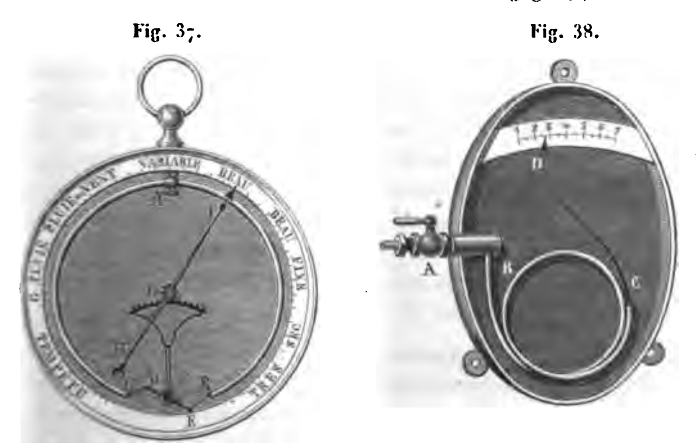


$$\alpha = \frac{Pl^3}{Fbc^3}.$$

Cette formule a été trouvée directement par la théorie et vérifiée par l'expérience.

Baromètres et manomètres métalliques. — Quand un tube élastique circulaire de laiton mince, à section elliptique, est fermé par ses deux bouts et qu'on augmente la pression extérieure ou intérieure, il se redresse ou se courbe. M. Bourdon s'est appuyé sur cette propriété pour construire un baromètre et un manomètre. Dans le baromètre (*fig.* 37) le tube est

Fig. 37. Fig. 38.



vide; il est fixé en A et libre en B et C. Si la pression atmosphérique aug-

mente, les extrémités B et C se rapprochent et poussent un levier q
transmet ses mouvements à l'aiguille HI. Quand le tube n'est pas vide
l'avance et qu'il communique avec une machine pneumatique, il se courb
quand on raréfie l'air intérieur, et indique le degré de vide.

Le manomètre se compose d'un tube BC (*fig.* 38), plusieurs fois recour
et communiquant avec l'enceinte dont on veut mesurer la pression. Qua
celle-ci augmente, l'aiguille CD fait connaître la pression. Cet appareil e
employé dans les locomotives.

Limite de l'élasticité. — Les corps ne reviennent pas toujours à leu
état primitif quand les forces cessent d'agir; il y a souvent des déforma
tions permanentes. Un fil étiré par un poids faible reprend sa longueu
première quand cette charge est enlevée; mais soumis à l'action de poi
considérables, il garde après l'étirement une partie de son allongemen
On peut tordre une verge d'un petit angle sans l'altérer; mais si l'on dépass
une certaine limite, elle reste tordue. De même, un ressort trop tendu se
déforme. C'est par là que s'explique l'allongement d'un fil qu'on passe à
filière, l'empreinte que reçoit un disque métallique frappé par un balan-
cier, l'effet du laminoir, celui du martelage, etc. Il y a donc une limite
l'élasticité des corps, mais tous ne l'atteignent pas aussi vite ; le caout-
chouc, par exemple, subit des allongements énormes qui ne persisten
pas, tandis que le plomb se déforme avec la plus grande facilité.

Prenons un fil d'une section égale à 1 millimètre carré, et cherchon
le poids limite à partir duquel il éprouve un allongement permanent. Cett
recherche offre une difficulté : c'est que le temps pendant lequel se pro-
longe l'action influe sur le résultat. Une fois commencé, l'allongement se
continue lentement. C'est ainsi que les ressorts se fatiguent à la longue
que les poutres des plafonds se fléchissent peu à peu, que les édifices se
tassent avec le temps. Il faut donc convenir d'un temps au bout duquel
on constate l'allongement ; on le fera, par exemple, au bout d'une heure

La limite d'élasticité des métaux diminue quand on les recuit. Par con-
séquent, un fil recuit s'allongera aisément à la filière, pendant qu'un f
déjà écroui ne s'allongera plus. C'est pour cela aussi que les ressorts sont
en acier trempé, et qu'après avoir passé un métal au laminoir, il faut le
recuire si l'on veut continuer de l'allonger.

Ténacité. — Si la charge augmente toujours, le fil étiré finit par se
rompre. On nomme *coefficient de rupture* le poids qui brise un fil de lon-
gueur quelconque et de section égale à 1 millimètre; il mesure la *ténacité*
du métal. Mais le temps a encore ici son influence.

Aussitôt qu'on dépasse la limite d'élasticité, le fil s'allonge, puis se casse

brusquement. Sous une charge moyenne longtemps continuée, on peut rompre une verge qui résiste à une action beaucoup plus forte qui agit pendant moins de temps. C'est un fait dont on doit tenir compte dans les constructions.

Le tableau suivant contient la limite d'élasticité et le coefficient de rupture de quelques métaux.

On remarquera qu'entre le poids qui produit la rupture et celui qui marque la limite d'élasticité, il y a une différence inégale : plus elle est grande, plus le métal sera ductile.

MÉTAUX.		LIMITE D'ÉLASTICITÉ.	COEFFICIENT DE RUPTURE.
		k	k
Plomb	Étiré	0,25	2,50
	Recuit	0,20	1,80
Étain	Étiré	0,40	2,45
	Recuit	0,20	1,70
Or	Étiré	13,50	27,00
	Recuit	3,00	10,08
Argent	Étiré	11,00	29,00
	Recuit	2,50	16,02
Cuivre	Étiré	12,00	40,30
	Recuit	3,00	30,54
Platine	Étiré	26,00	34,10
	Recuit	14,50	23,50
Fer	Étiré	32,50	61,10
	Recuit	5,00	46,88
Acier fondu	Étiré	55,60	83,80
	Recuit	5,00	65,70

CHAPITRE II.

EFFETS DE LA PESANTEUR ET DE LA PRESSION SUR LES LIQUIDES.

I. — CONSTITUTION DES LIQUIDES.

On suppose quelquefois les liquides incompressibles : il n'y a rien de plus inexact. Si cela était, ils n'auraient aucune des propriétés que nous leur voyons. Il faut au contraire considérer les liquides comme des corps élastiques aussi bien que les solides; quand on les enferme dans un vase résistant et qu'on cherche à enfoncer un piston dans leur intérieur au moyen d'un poids, on rapproche les molécules et on développe entre elles des forces répulsives. Aussitôt que la compression cesse, ces forces ramènent les molécules à leurs distances premières, et le liquide à son état initial. On retrouve donc ici les deux phénomènes constatés dans les solides : une diminution du volume total, c'est la *compressibilité;* et une tension intérieure qui fait équilibre à l'effort exercé et se développe dans toute la masse : on la nomme la *pression du liquide*.

Fig. 39.



Compressibilité. — Les Académiciens de Florence ont cherché à constater la compressibilité de l'eau sans pouvoir y réussir. Canton la mit hors de doute en 1761. Œrsted, Colladon et Sturm, et depuis, M. Regnault et M. Grassi, l'ont mesurée avec soin. Voici la méthode la plus simple qu'on puisse employer pour le faire.

Un tube de verre DCA (*fig.* 39), qu'on appelle *piézomètre*, est compr

d'un large réservoir A, surmonté d'une tube capillaire CD, bien cylindrique et muni de divisions équidistantes. On pèse le tube vide, puis on y introduit du mercure. A cet effet, on chauffe le réservoir, puis on retourne la pointe dans un bain de mercure qui monte pendant le refroidissement; on recommence l'opération jusqu'à ce que le tube soit rempli; alors on le refroidit en l'entourant de glace; au bout de dix minutes on le pèse, on retranche du poids total P celui du tube vide p, et $\frac{P-p}{D}$ est la capacité de l'instrument, D étant la densité du mercure à zéro.

En chauffant de nouveau, on fait sortir un peu de mercure, on refroidit dans la glace, on note la division où s'arrête le mercure, et on pèse encore une fois. La diminution de poids P — P' divisée par D fait connaître le volume des n divisions vides, et $\frac{P-P'}{nD}$ exprime la capacité d'une division.

Le vase DCA est plongé dans un vase fermé BB plein d'eau et qui se termine par un tube ouvert EG dont le diamètre est égal à celui du tube CD. On comprime le liquide dans le piézomètre par son extrémité D qui est mise en communication avec une pompe de compression. Alors deux phénomènes se produisent : 1° le liquide diminue de volume; 2° le vase A s'agrandit; et pour ces deux raisons le niveau C s'abaisse. Mais en s'agrandissant le vase A refoule le liquide extérieur qui monte dans le tube EG. En retranchant cette élévation de l'abaissement en C, on a la compressibilité vraie du liquide. Voici quelques résultats pour une pression égale à l'atmosphère.

Liquides.	Température.	Compressibilité.
Mercure	0°,0	0,000 002 95
Eau	0,0	0,000 050 3
»	4,1	0,000 049 9
»	10,8	0,000 048 0
»	18,0	0,000 046 3
»	25,0	0,000 045 6
»	53,0	0,000 044 1
Eau de mer	17,5	0,000 043 6
Éther	0,0	0,000 121
Alcool	7,3	0,000 084
Esprit de bois	13,5	0,000 091 3
Chloroforme	8,5	0,000 062 5

Élasticité, pression. — Les liquides jouissent d'une propriété caractéristique : ils n'affectent aucune forme par eux-mêmes, mais ils prennent celle des vases où on les renferme. Leurs molécules, au lieu d'être liées l'une à l'autre comme elles le sont dans un solide, peuvent glisser sans

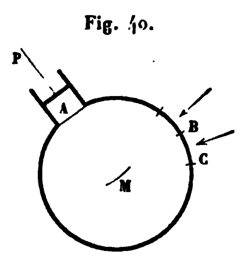
frottement sous l'influence de l'effort le plus faible et se déplacer continuellement, chacune d'elles occupant et quittant successivement une place déterminée où elle est remplacée par une autre sans que l'équilibre général soit troublé.

On admet, comme une conséquence naturelle de cette mobilité, que si un liquide n'était pas soumis à l'action de la pesanteur, il devrait être constitué d'une manière identique dans toutes ses parties, être composé de molécules distribuées également dans toute la masse et tenues à des distances moyennes égales dans toutes les directions.

Si dans un vase fermé (*fig.* 40) on introduit un piston A, et qu'on le pousse par un poids P, il s'enfoncera, puisque le liquide est compressible. Alors les molécules se rapprocheront. Rapprochées, elles se repousseront : c'est l'élasticité. Elles presseront les parois, qui s'étendront jusqu'à ce qu'elles exercent à leur tour sur le liquide une force de réaction égale à l'effort qui les pousse. Dans ce nouvel état, les molécules seront encore également distribuées dans toute la masse et tenues à des distances moyennes égales dans toutes les directions; seulement, leur distance est devenue moindre. Elles sont en tension comme un ressort, et cette tension est égale partout et dans tous les sens, à cause de la symétrie du liquide.

Considérons un élément quelconque M. Les molécules qu'il sépare exercent de part et d'autre une force répulsive réciproque, comme s'il y avait entre elles un ressort tendu. Cette force se nomme la *pression* sur l'élément. Puisque l'équilibre existe, la pression est égale sur les deux faces, et à cause de la symétrie du liquide dans tous les sens, elle est *normale à la surface, indépendante de sa direction, et la même sur tous les éléments égaux que l'on imaginera, soit dans l'intérieur du liquide, soit contre la paroi.*

Fig. 40.



Cette loi, qui résume les propriétés des liquides, est connue sous le nom de *principe d'égalité de pression*. On va la généraliser.

1° Soit a la surface du piston (*fig.* 40), chargé du poids P; le liquide exerce contre lui une réaction égale au poids P puisqu'elle lui fait équilibre, et toute surface a intérieure ou sur la paroi éprouvera la même pression P. Si donc on considère en B ou en C des orifices de section a, il faudra, pour maintenir l'équilibre, y exercer de l'extérieur à l'intérieur un effort P.

On dit alors que la pression exercée en A s'est transmise à B et à C, et l'on doit entendre par là que le liquide ayant diminué de volume exerce une réaction élastique égale dans tous les sens et dans toutes ses parties.

2° Puisque la pression P exercée par le piston A se transmet séparément à chacune des deux surfaces voisines B et C, égales à a, on peut les supposer réunies, ce qui constituera un piston de surface $2a$, et il supportera une pression 2 P. De même, si le piston était égal à $3a$, il aurait une pression 3 P, et, en général, toutes les surfaces planes que l'on peut considérer dans l'intérieur du vase éprouvent des pressions proportionnelles à leur superficie.

3° Si le piston comprimant est chargé d'un poids P et que sa section soit égale à 1, l'effort transmis sur des surfaces 1, 10, 100, 1000 sera égal à P, 10 P, 100 P, 1000 P. Avec un poids faible on pourra conséquemment exercer une action aussi grande qu'on le voudra.

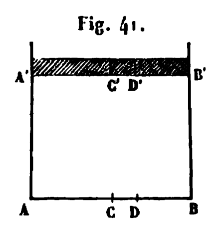
4° On peut changer les termes de cette proposition et dire que si l'on prend des pistons comprimants dont les superficies soient 1, 10, 100, 1000, et qu'on les charge de poids P, 10 P, 100 P, 1000 P, on produira toujours le même effort P sur une surface égale à l'unité, c'est-à-dire une pression constante dans l'intérieur du liquide.

II. — DISTRIBUTION DES PRESSIONS DANS LES LIQUIDES PESANTS.

Jusqu'à présent nous avons raisonné le cas tout à fait hypothétique où les liquides ne seraient pas soumis à l'influence de la pesanteur. Cette force modifie l'état d'équilibre en faisant naître des pressions dans l'intérieur des liquides, mais sans détruire leurs propriétés fondamentales. Si de plus on exerce sur eux une action extérieure, ils sont à la fois soumis à cette action et à la pesanteur, et les effets se superposent.

Admettons qu'un vase de forme quelconque soit rempli d'un liquide sans pesanteur et qu'il soit pressé par une lame A′B′ (*fig.* 41) agissant par son poids comme un piston. Elle exercera sur toute surface égale à la sienne, AB par exemple, une pression égale à son poids total. Sur une surface AC moitié de la sienne, elle communiquerait une pression égale à la moitié de son poids, c'est-à-dire égale au poids de la moitié A′C′ de sa surface. En général elle produira sur une étendue quelconque CD une pression égale au poids d'une étendue égale C′D′. Chaque surface, soit dans l'intérieur de la masse liquide, soit sur la paroi, sera donc dans le même cas que si elle était couverte par une portion de piston égale à elle-même.

Fig. 41.



Ce piston pourrait avoir une dimension quelconque sans que l'effet fût changé, car si sa surface était 1, 10, 100,..., son poids serait P, 10P, 100P,..., et exercerait une pression constante P sur chaque unité de surface intérieure.

Ainsi la pression exercée par un pareil piston serait : 1° constante dans tout le liquide; 2° indépendante de la direction des surfaces pressées; 3° égale et opposée sur les deux faces de chaque élément; 4° elle agirait sur chaque surface comme si celle-ci était soumise au poids d'une étendue de piston égale à la sienne; 5° elle ne varierait pas si la grandeur du piston, c'est-à-dire si la forme du vase changeait.

Considérons maintenant les liquides tels qu'ils se présentent à nous, c'est-à-dire pesants. Dans les cas d'équilibre, leur surface supérieure devra être horizontale; car si elle était inclinée (*fig.* 42), une molécule M pourrait être considérée comme soumise à deux composantes de son poids, l'une normale, l'autre parallèle à la surface : la première de ces forces ne produirait aucun mouvement; la deuxième, au contraire, ferait glisser la molécule. L'équilibre ne sera atteint que si cette composante devient nulle, c'est-à-dire si la surface du liquide est normale à la pesanteur, ainsi que le montre l'expérience.

Fig. 42.

Décomposons la masse liquide en tranches horizontales infiniment minces (*fig.* 43), elles comprimeront celles qui sont au-dessous d'elles, et seront pressées par celles qui sont au-dessus, comme si elles étaient autant de pistons superposés. Mais chaque tranche ayant une épaisseur élémentaire, on peut admettre que la pression y sera constante, ce qui revient à dire que le liquide qu'elle contient peut être considéré comme étant sans poids. Nous voici conséquemment conduits à assimiler chaque tranche élémentaire MN à un liquide non pesant, soumis au poids d'une couche liquide superposée dont *l'épaisseur est constante* et qui réalise précisément le piston hypothétique que nous avons précédemment imaginé. Répétons en les développant, les conséquences que nous avons exprimées précédemment :

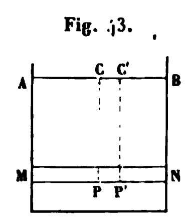


Fig. 43.

1° La pression sera la même dans toute l'étendue de la couche horizontale MN.

2° Si l'on considère dans cette tranche un élément superficiel quelconque, horizontal, vertical ou incliné, placé dans le liquide ou sur la paroi, il subira toujours la même pression.

3° Chaque surface prise à l'intérieur du liquide sera pressée sur ses deux côtés par des forces égales et opposées en chaque point.

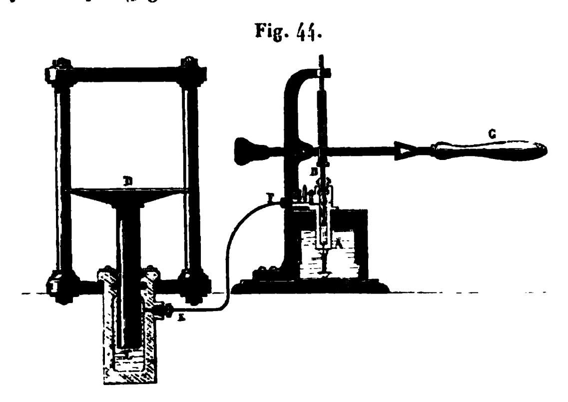
4° La pression exercée sur une surface élémentaire quelconque PP′ est égale au poids du liquide superposé ou au poids d'une colonne cylindrique de liquide ayant pour base cet élément et pour hauteur sa distance au niveau du liquide.

5° Puisque les pressions exercées par un piston pesant ne variaient pas avec sa surface, et qu'il est ici remplacé par une série de couches élémentaires pesantes, la pression ne dépendra pas de l'étendue de chacune d'elles; par conséquent, si le vase s'élargissait ou se rétrécissait vers le sommet, s'il était droit ou incliné, ou s'il avait une forme quelconque, on trouverait toujours la même pression dans la couche, pourvu que la hauteur du liquide fût la même.

6° Enfin une pression exercée par un effort mécanique sur une surface donnée de la paroi se transmet également sur des surfaces égales, et proportionnellement aux superficies si elles sont inégales: ces effets s'ajoutent à ceux que produit la pesanteur.

Presse hydraulique. — Après avoir démontré que la pression exercée par un piston de section 1 se transmet en se multipliant par 10, 100, 1000,... sur un second piston de section 10, 100, 1000,..., Pascal imagina la presse hydraulique (*fig.* 44). Elle se réduit essentiellement à une petite

Fig. 44.

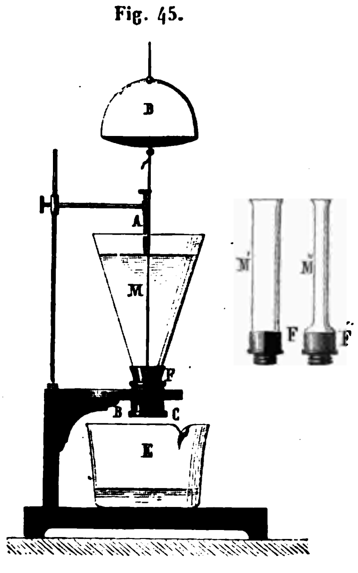


pompe foulante AB par laquelle on injecte de l'eau dans un vase C où se meut un large piston ascendant CD; l'eau que l'on introduit soulève ce piston, qui comprime contre un obstacle fixe les objets dont il est chargé. Cet appareil, destiné à utiliser la loi des pressions, peut servir à la démontrer. On placera 1000 kilogrammes sur le grand piston, et l'on cherchera

le poids qu'il faut poser sur le piston de la pompe pour les équilibrer suffit de 1 kilogramme si le rapport des surfaces est de 1000 à 1.

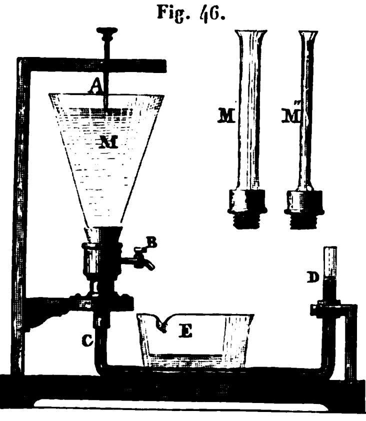
Appareil de Pascal. — Un vase en verre M (*fig.* 45), maintenu dans un support, se termine par un cylindre creux de métal F, dont le fond est fermé par un obturateur plan BC qui est soutenu au plateau D d'une balance. On verse de l'eau dans le vase, ce qui détermine une pression qui augmente peu à peu. Dès qu'elle dépasse les poids qui sont dans la balance, on voit tomber l'obturateur et l'eau s'écoule dans le vase E. Alors le niveau baisse, la pression s'affaiblit, l'obturateur se relève pour se coller de nouveau contre le vase et le fermer. On marque, au moyen d'une pointe affleurante A, le niveau qu'avait le liquide au moment de la rupture d'équilibre, et on constate qu'il est indépendant de la forme du vase en remplaçant celui-ci par d'autres vases M', M''; enfin, on trouve que les poids qui retiennent l'obturateur sont égaux au poids du cylindre de liquide qui le couvre.

Fig. 45.



Appareil de de Haldat. — M. de Haldat a construit, pour la même vérification, un appareil plus connu (*fig.* 46); il consiste en un tube de verre CD, recourbé verticalement à ses deux extrémités, terminé en D par une branche de verre et raccordé en C à une douille métallique sur laquelle on visse des vases de forme diverse disposés comme ceux de l'appareil précédent et surmontés comme eux d'une pointe A pour marquer les niveaux. Le tube est plein de mercure, c'est la surface terminale

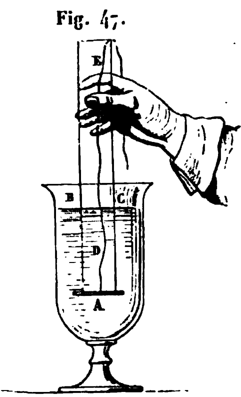
Fig. 46.



de ce liquide qui forme en C le fond du vase : c'est sur elle que la pression s'exerce. En versant de l'eau jusqu'à la pointe A, on voit monter le niveau en D, à une hauteur qui est indépendante de la forme des vases M, M', M''.

Pressions de bas en haut. — Pour prouver que les pressions sont égales sur les deux faces d'une lame plongée, on applique contre les bords rodés d'un tube large ED (*fig.* 47) une carte mince A dont le poids peut être négligé, on plonge l'appareil dans l'eau, et l'on constate que l'obturateur ne tombe pas lorsqu'on lâche le fil DE ; il est donc maintenu par une pression de bas en haut. Pour la mesurer, on verse de l'eau dans le tube ; le disque A commence à s'affaisser quand le niveau intérieur dépasse celui du vase ; la pression inférieure est donc égale au poids du cylindre liquide qui a le disque pour base et sa distance au niveau pour hauteur.

Fig. 47.



Pressions latérales. — Pour prouver qu'il y a des pressions latérales, on place sur un flotteur de liége (*fig.* 48) un vase plein d'eau et muni d'un conduit latéral A. Quand ce conduit est bouché, le liquide qu'il contient éprouve une pression de A' vers A, et la paroi opposée A' en éprouve une autre égale et contraire ; toutes deux s'équilibrent. Quand on ouvre le conduit, ces deux forces d'action et de réaction exercent leur effet, l'une fait marcher l'eau, l'autre fait reculer le vase.

Fig. 48.

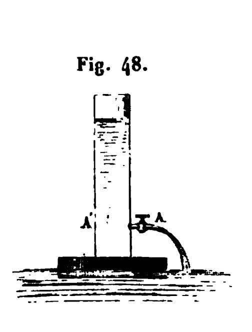
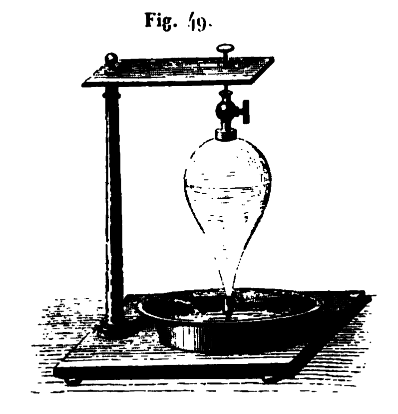


Fig. 49.



Le tourniquet hydraulique (*fig.* 49) est fondé sur le même principe.

C'est un vase plein d'eau qui est mobile autour d'un axe vertical, et porte à sa base deux tubes horizontaux recourbés; quand on ouvre le robinet, les tubes laissent écouler l'eau, reculent par la réaction, et l'appareil tourne autour de son axe.

Composition des pressions. — Une surface horizontale dans un liquide éprouve sur tous ses éléments des pressions égales et parallèles; leur résultante, égale au poids du liquide superposé, passe par le centre de gravité de la surface. Sur une surface quelconque ABCD verticale ou inclinée, la pression supportée par chaque élément augmente avec la profondeur; la résultante n'est donc pas appliquée au centre de gravité, mais en un point plus bas que l'on nomme *centre de pression*. Le calcul montre qu'il varie pour une même surface avec la direction de la surface, sa profondeur d'immersion et son inclinaison.

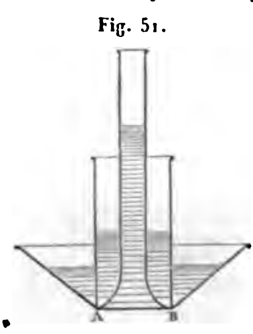
Fig. 50.

Soit un rectangle vertical ABCD (*fig.* 50) dont le bord AB affleure la surface du liquide. On peut le rabattre horizontalement en A'B'CD et placer verticalement sur tous ses éléments le filet liquide dont le poids exprime la pression qu'ils supportent. Ces filets réunis formeront un prisme ABCDA'B', et le poids appliqué à son centre de gravité G représente la pression totale éprouvée par le rectangle. Le point G se trouve aux deux tiers de la ligne qui joint le milieu E de A'B' au milieu de ABCD, et le point P, où la verticale de G rencontre le plan A'B'CD, correspond aux deux tiers de EF: c'est le centre de pression.

Si la surface pressée s'enfonçait dans le liquide en restant parallèle à elle-même, le centre de pression se relèverait vers AB; à une grande profondeur il coïnciderait presque avec le milieu de EF.

Paradoxe hydrostatique. — Versons 1 kilogramme d'eau dans un vase cylindrique (*fig.* 51) dont la base AB est égale à 1 décimètre carré; le niveau s'élèvera à une hauteur égale à 1 décimètre, et la pression supportée par la base sera égale au poids du liquide, c'est-à-dire à 1 kilogramme. Si le vase s'élargissait assez pour que la hauteur du liquide se réduisît à 1 centimètre, la pression sur le fond se réduirait à 100 grammes; si le vase se rétrécissait de manière que l'eau montât à 1 mètre, la pression serait de 10 kilogrammes. Cependant, dans tous ces cas, on peut placer le vase sur le plateau d'une balance, et le poids total de l'eau

Fig. 51.

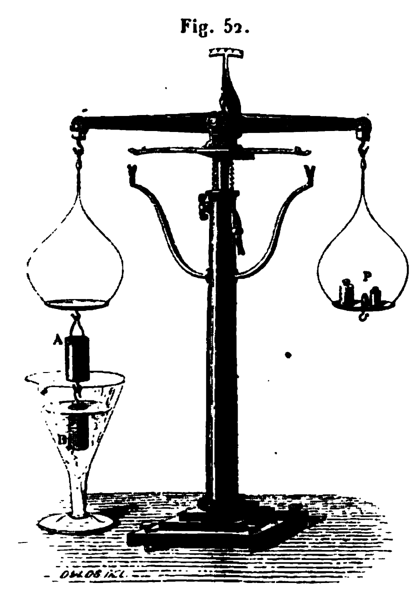


est toujours égal à 1 kilogramme. Cette contradiction apparente entre la pression qui est variable et le poids du liquide qui est constant se nomme le *paradoxe hydrostatique*. Mais en réfléchissant à ce résultat on voit que cette contradiction vient de ce que, d'une part, on exprime exclusivement la pression qui se produit sur le fond, et que, de l'autre, la balance indique la résultante verticale de toutes les pressions exercées sur toutes les parois; c'est celle-ci qui est constante, et c'est ce que nous allons démontrer.

III. — PRINCIPE D'ARCHIMÈDE ET VASES COMMUNIQUANTS.

Cherchons la résultante totale des pressions exercées sur la surface d'un corps plongé dans un liquide. Isolons par la pensée une masse quelconque de ce liquide; elle est en équilibre et ne tombe pas : il faut donc admettre que son poids est détruit par la réaction du liquide qui l'entoure, c'est-à-dire qu'elle est soumise à des pressions dont la résultante totale est égale et directement opposée à son poids. Or ces pressions sont indépendantes de la nature de la surface et de celle du corps plongé; leur résultante sera donc la même pour tous ceux qui auront la même enveloppe que la masse liquide qui vient d'être imaginée; donc tout corps plongé dans un liquide éprouve une poussée verticale de bas en haut, appliquée à son centre de gravité et égale au poids du liquide déplacé, ou bien : *tout corps plongé dans un liquide perd un poids égal à celui du liquide déplacé*. Cette loi est due à Archimède et porte son nom.

Fig. 52.

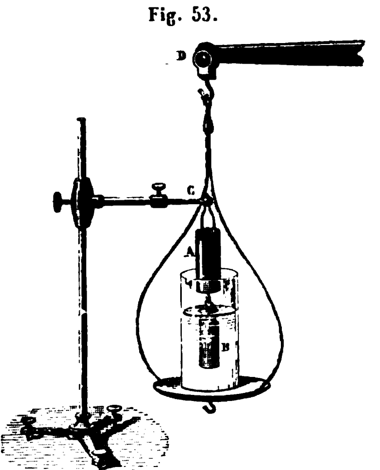


Pour justifier expérimentalement le principe d'Archimède, on prend un vase de cuivre A (*fig.* 52) et un noyau de métal B qui le remplit exactement; on accroche le vase au plateau d'une balance, le noyau à la base du vase, et après les avoir équilibrés par des poids, on les descend dans un

vase contenant de l'eau. Aussitôt le système se relève et l'équilibre e rompu; il y a donc une *poussée*. Pour la mesurer, on verse de l'eau d le vase A; l'équilibre se rétablit quand il est plein et que le noyau est e tièrement plongé. La poussée qu'éprouve un corps immergé est donc é au poids d'un volume de liquide égal au sien.

Mais pendant que le poids du corps plongé diminue, celui de l'eau d laquelle il est plongé augmen et ce qu'il perd, elle le ga Pour le montrer, on suspend même système à un support fix (*fig.* 53), et on met l'eau sur l balance; son poids augmente au sitôt que le noyau plonge. Po rétablir l'équilibre, on puisera l'eau dans le verre, on la vers dans le cylindre, et quand il s plein, le fléau sera redevenu ho zontal.

Fig. 53.



En effet, on sait que si l'on pl sur un plateau de balance un va plein d'eau et un solide, le po ne varie pas, que le corps s dans le vase ou à côté. Or, pu que en pénétrant dans l'eau le solide perd de son poids, il faut que l'ea gagne ce qu'il perd.

Liquides superposés. — Quand on aura mêlé du mercure et de l'ea dans un vase en les agitant, et qu'ensuite on les laissera reposer, chaq gouttelette de mercure disséminée au milieu de l'eau tombera au fond d vase; chaque particule d'eau emprisonnée dans le mercure s'élèvera, bientôt les deux liquides seront séparés. Que l'on mêle, au contraire, l'huile avec de l'eau, l'huile, qui a une moindre densité, montera a sommet, et si l'on avait mélangé ces trois liquides entre eux, ils s seraient séparés d'eux-mêmes par le repos et se seraient superposés p ordre de densité. Il est même facile de voir que la surface de séparation d chacun d'eux sera horizontale, car chaque molécule qui s'y trouve éta sollicitée par une force verticale, tendrait à glisser sur la surface si celle était inclinée.

Corps flottants. — 1° Quand le corps plongé a la même densité que l liquide, il se tient en équilibre dans la masse. Un œuf, par exemple, a un

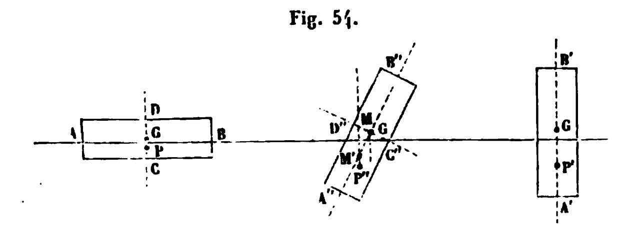
densité plus grande que celle de l'eau, mais plus petite que celle de l'eau saturée de sel ; il enfonce dans l'eau et surnage sur l'eau salée et il se tient en équilibre dans un mélange convenable des deux liquides. L'huile peut également se soutenir dans un mélange formé d'eau et d'alcool en proportions déterminées ; elle se présente alors sous la forme d'une sphère qui reste immobile.

2° Si la densité du corps plongé est moindre que celle du liquide, la poussée est plus grande que le poids et le corps s'élève. A partir du moment où il sort du liquide, le volume déplacé diminue ainsi que la poussée ; il arrive un instant où elle est égale au poids, et l'équilibre s'établit. Ainsi les corps plus légers que les liquides où ils plongent s'y maintiennent en équilibre en partie immergés, en partie émergés, quand ils déplacent un poids de liquide égal au leur.

3° Le poids du corps étant toujours appliqué à son centre de gravité, et la poussée au *centre de poussée*, c'est-à-dire au centre de gravité de la partie immergée, il faut non-seulement que ces forces soient égales, mais encore qu'elles se détruisent, ou que les centres de gravité et de poussée soient sur une même verticale. D'où il résulte qu'une sphère sera en équilibre quelle que soit sa position ; un ellipsoïde, quand l'un de ses axes sera vertical ; un parallélipipède droit à base rectangulaire, quand l'un de ses trois systèmes d'arêtes sera vertical.

4° Il faut, en troisième lieu, que l'équilibre soit stable, c'est-à-dire que les forces auxquelles le corps est soumis soient dirigées de manière à le ramener à sa position initiale quand on l'en a écarté très-peu. Supposons que le corps flottant soit une planche AB couchée horizontalement sur le liquide (*fig.* 54) ; le centre de gravité sera en G, le centre de poussée sera

Fig. 54.



en P, et ces deux points étant sur une même verticale, l'équilibre aura lieu. Que l'on vienne maintenant à incliner la planche dans la position A″B″, la poussée agira de bas en haut en P″, le poids de haut en bas sur G, et le corps reprendra sa position d'équilibre. Si, au contraire, la planche avait été primitivement verticale comme en A′B′, l'équilibre eût été

instable, car étant inclinée en A″B″, elle se serait éloignée de la se-
tion A′B′ pour se coucher à plat sur le liquide en AB.

Mesure des pressions. — La pression P qui s'exerce dans un liqu
sur une surface A est un poids proportionnel à cette surface; elle p
toujours être exprimée par le poids d'un cylindre liquide superposé à
de hauteur h et de densité d :

$$P = Ahd.$$

Pour caractériser la pression en un point, il est inutile de conside
une surface quelconque A, on exprime la pression sur l'unité de surfa

$$p = hd.$$

Au lieu de prendre un liquide quelconque, on convient générale
d'adopter le mercure, dont la densité est 13,59, et, pour abréger, de d
signer la pression par la hauteur h elle même. On dit alors que la pre
est de 10, 15, 20 centimètres de mercure, pour exprimer qu'elle est s
chaque unité de surface égale au poids d'une colonne de mercure qui au
cette surface pour base et pour hauteur 10, 15, 20 centimètres.

On pourrait exercer la même pression sur la même surface A avec
autre liquide de densité D, il faudrait que l'on eût

$$Ahd = AHD,$$

c'est-à-dire que les hauteurs fussent en raison inverse des densités.

Vases communiquants. — Tout ce que nous avons dit de l'équili
des liquides étant indépendant de la forme des vases s'applique égalem
aux *vases communiquants*.

Si un même liquide remplit le vase ABC (*fig.* 55), il faudra que cha
tranche horizontale supporte la mêm
pression, ce qui exige que les de
niveaux A et O soient les mêm
absolument comme dans un v
simple. Mais le cas devient plus com
pliqué si l'une des branches A (*fig.*
contient un liquide plus léger q
celui qui est en C, par exemple
y a du mercure en CBD et de l'eau de D en A. Imaginons une cloiso
en B. Chaque unité de surface de cette cloison subira, du côté de C, un
pression égale au poids d'une colonne de mercure de hauteur BE, et d
côté opposé, la pression d'une colonne mixte formée d'une hauteur BF de

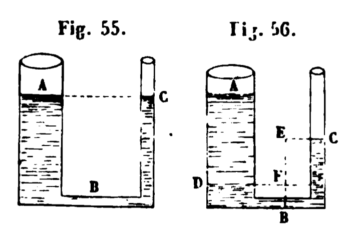


Fig. 55. Fig. 56.

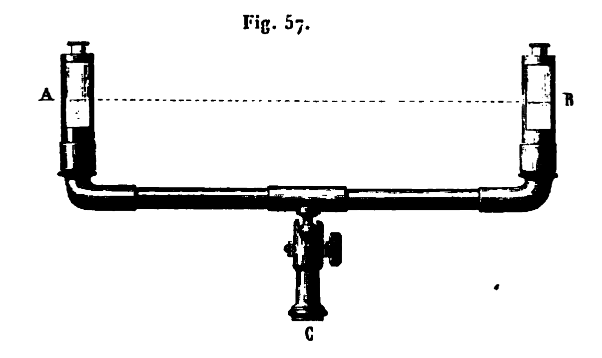
mercure jusqu'en D et d'une hauteur H d'eau jusqu'en A. Les pressions des deux colonnes de mercure de hauteur BF se font équilibre des deux côtés; il ne restera donc à droite que la partie FE ou h, pour faire équilibre à la colonne d'eau DA ou H. D'après ce que nous venons de dire, on devra avoir $hd = \mathrm{HD}$, ou bien

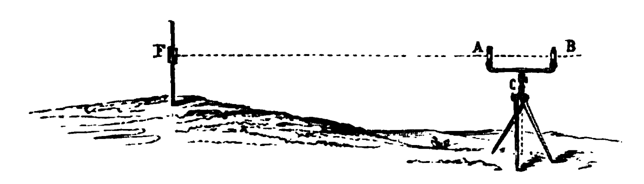
$$\frac{h}{\mathrm{H}} = \frac{\mathrm{D}}{d},$$

c'est-à-dire que *les hauteurs des deux liquides au-dessus de leur surface de séparation doivent être en raison inverse des densités.* Elles seront toujours égales quand les densités seront les mêmes.

Niveau d'eau. — Un appareil précieux est fondé sur cette propriété : c'est le niveau d'eau (*fig.* 57); il se compose d'un tube de métal, laiton ou

Fig. 57.



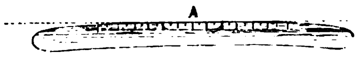


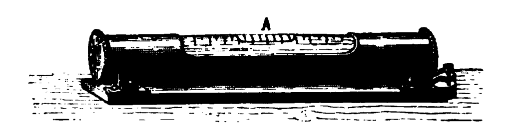
fer-blanc, que l'on fixe à peu près horizontalement sur un pied à trois branches; il se retourne à ses deux extrémités et se termine par deux tubes de verre cylindriques A et B; on l'emplit avec de l'eau ordinaire, et les niveaux dans les tubes extrêmes se placent à la même hauteur. Ordinairement ces tubes sont terminés par des goulots que l'on ferme avec des bouchons percés pour empêcher l'eau de s'écouler pendant les transports,

sans cependant exclure la pression atmosphérique. Cet appareil sert aux nivellements, et voici comment on y procède. Pendant qu'une personne placée au loin implante verticalement en F une mire divisée, l'observateur dirige un rayon visuel par les deux surfaces liquides du niveau, et fait de la main le signe d'élever ou d'abaisser le voyant de la mire. Quand celui-ci a été placé sur le prolongement du rayon visuel, on lit sur la mire sa distance au sol. On répète ensuite la même opération avec une seconde mire placée du côté opposé, et en retranchant la nouvelle lecture de la première, on obtient la différence de niveau des deux stations occupées par les mires. En continuant ces opérations, on finit par avoir les hauteurs relatives de deux points très-éloignés.

Niveau à bulle d'air. — Cet instrument est formé par un tube de verre courbé (*fig.* 58) qui est rempli d'eau, sauf un très-petit espace

Fig. 58.





occupé par une bulle d'air. Elle vient se placer symétriquement par rapport au point A si le plan tangent au tube en ce point est horizontal; si ensuite on incline le tube, la bulle se déplace et son milieu se fixe à chaque fois au point du tube pour lequel le plan tangent est horizontal. On trace sur le verre des divisions symétriques par rapport au point A; elles servent à fixer la distance du milieu de la bulle au point A, et par suite l'inclinaison du niveau. On enferme ensuite le tube dans un étui de laiton.

Si l'on veut employer le niveau à reconnaître quand un plan est horizontal, on le fait reposer sur une règle de cuivre. Cette règle étant appliquée sur une surface donnée, la bulle s'arrêtera au centre du tube si la surface est horizontale.

IV. — PHÉNOMÈNES CAPILLAIRES.

Faits généraux. — Quand on plonge dans l'eau un tube de verre capillaire, c'est-à-dire un tube dont le canal intérieur est très-fin, on

constate que le niveau en A (*fig.* 59) est plus élevé qu'en BC, et que la surélévation est d'autant plus grande que le canal est plus étroit. La différence de niveau se constate également dans un vase communiquant dont l'une des branches est large, l'autre étroite (*fig.* 60). Tous les liquides qui mouillent le tube se comportent de la même manière, à l'énergie du phénomène près. Ceux qui ne le mouillent point, comme le mercure dans le verre, agissent inversement : leur niveau s'abaisse, soit dans un tube plongé, soit dans un vase communiquant (*fig.* 61). On voit donc que, dans les vases capillaires, la loi d'égalité du niveau ne se justifie pas.

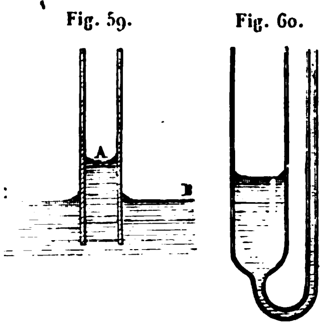


Fig. 59. Fig. 60.

Ces changements de niveau sont toujours accompagnés d'un changement de forme de la surface qui termine le liquide dans l'espace capillaire ; elle est concave quand elle est surélevée, convexe lorsqu'elle est déprimée. Ces phénomènes, désignés sous le nom d'*actions capillaires*, ne sont pas en contradiction avec les propriétés générales des liquides ; ils sont produits par des forces que jusque-là nous avions négligées.

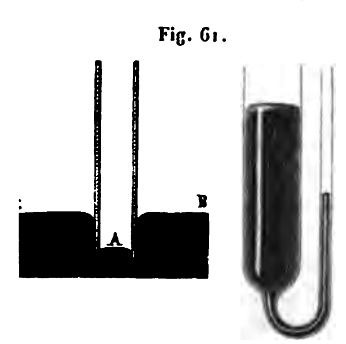


Fig. 61.

Attraction moléculaire. — L'attraction que les corps exercent entre eux, à des distances quelconques, se fait nécessairement sentir entre les molécules des substances en contact ; alors elle devient très-considérable, puisque leur distance est très-petite. On lui donne le nom d'*attraction moléculaire*.

Pour prouver qu'elle s'exerce dans les solides, on taille sur deux balles de plomb deux facettes égales et bien nettes ; on les place ensuite en contact en serrant et tournant les balles l'une contre l'autre, afin de chasser l'air interposé ; aussitôt elles adhèrent, et il faut un effort de plus de 100 grammes pour les séparer. On fait la même expérience avec deux disques de verre égaux et plans (*fig.* 62), et comme l'expérience réussit dans le vide, on ne peut attribuer leur adhérence qu'à une attraction réciproque ; on remarque même qu'elle augmente avec le temps.

L'attraction moléculaire entre les molécules liquides se montre dans u foule de phénomènes.

1° Une goutte de mercure qui tombe sur une table se rassemble une petite sphère, forme qui s'explique, exactement comme celle corps célestes, par l'attraction. Il est m évident que le globule de mercure se co porte comme si ses molécules n'étai point pesantes, puisqu'il reste sphériq cela veut dire que l'attraction mol laire est bien plus considérable que poids, lequel n'intervient pour déform le globule que si la quantité de merc augmente beaucoup; alors il s'aplatit, t en gardant sur ses bords la forme conv que lui donne l'attraction.

Fig. 62.



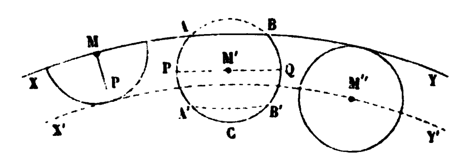
2° Quand on retire de l'eau une b guette de verre, on retire en même tem une goutte liquide qui s'allonge en lar et reste suspendue. Coupons dans la p sée cette goutte par un plan horizontal; les molécules qui sont au-dess ne tombant point, elles doivent être soutenues par une force qui les reti et fait équilibre à leur poids : c'est l'attraction exercée par celles qui au-dessus. La goutte tout entière étant de plus suspendue au verre co lequel elle pèse de tout son poids pour se détacher, il faut qu'elle y maintenue par une adhérence supérieure à ce poids, c'est-à-dire qu'il y entre le verre et le liquide une force d'attraction considérable.

Il y a donc des forces attractives : 1° entre les molécules voisines d même liquide; 2° entre un solide et le liquide qui le touche. On qu'elles décroissent rapidement quand la distance augmente, qu devinnent négligeables quand cette distance atteint une limite que l nomme le *rayon de l'attraction sensible*.

Pression moléculaire. — Concevons une masse liquide terminée p une surface quelconque XY (*fig.* 63). Une molécule M' sera attirée p toute la portion du liquide contenue dans une sphère décrite du point M comme centre avec le rayon de l'attraction sensible. La portion ABC p se décomposer en trois parties par trois plans équidistants AB, PQ, A'B parallèles à la surface AB. L'attraction exercée par ABPQ est détru par PQA'B', et tout se passe comme si la molécule n'était sollicitée q par le liquide A'B'C, ce qui donnera une force P' normale à la surfac

Cette force atteindra son maximum si la molécule est en M, à la surface même; elle diminue si la molécule s'enfonce et devient nulle quand celle-ci

Fig. 63.

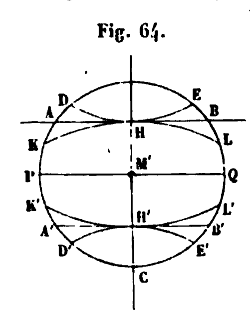


se trouve en M'', à une profondeur égale à la limite d'attraction, ou à une profondeur plus grande.

Si donc nous décrivons une surface X'Y' qui soit en tous ses points à une distance de XY égale au rayon de l'attraction sensible, nous avons une couche de molécules soumises à des forces qui agissent normalement de l'extérieur à l'intérieur, forces qui produisent un effet analogue à celui de la pesanteur et augmentent la densité du liquide entre XY et X'Y'. Il en résulte une pression qui se transmet dans tous les sens et dans toute la masse et sur toutes les parois, suivant les lois générales reconnues précédemment; on la nomme *pression moléculaire*.

Influence de la courbure des surfaces. — Nous allons prouver que cette pression varie quand la forme de la surface change. Pour cela considérons l'action exercée sur une molécule M' par tout le liquide placé autour d'elle dans la sphère d'attraction sensible. Si la surface est plane et figurée par AB (*fig.* 64), l'attraction exercée sur M' par ABPQ est détruite par celle que produit PQA'B', et il ne reste que l'action de A'B'C. Si elle est concave et terminée en DHE, il restera l'attraction de CD'H'E', qui sera moindre que dans le cas précédent. Si, au contraire, la surface terminale est convexe et figurée par KHL, la portion de liquide actif sera augmentée et représentée par CK'H'L'.

Fig. 64.



En répétant le même raisonnement pour tous les points tels que M', on voit que la pression moléculaire totale change avec la forme de la surface; on peut la désigner par A si cette surface est plane, par A — B si elle est concave, et par A + B si elle est convexe; elle se transmet dans tout le liquide et sur les parois; elle va modifier comme il suit les conditions d'équilibre.

Explication des variations de niveau. — 1° Quand un tube de verre

est plongé dans l'eau (*fig.* 65), la surface est concave en D, et la pression y est A — B; au niveau MN elle est A — B + h; en un point extérieur C la surface est plane et la pression égale à A; elle devient A + h' sur MN; mais comme les pressions sur MN doivent être égales, il faut qu'on ait

Fig. 65.

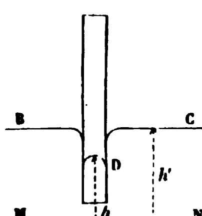
$$A + h' = A - B + h, \quad h = h' + B,$$

le niveau est donc plus élevé en D qu'en C, et la différence est égale à B.

2° Si la surface est plane dans l'espace capillaire, les pressions moléculaires sont les mêmes à l'intérieur et à l'extérieur, et il n'y a pas de changement de niveau.

3° Quand la surface est convexe dans le tube, la pression devient A + B en D, et A + B + h au niveau MN (*fig.* 66); nous aurons

Fig. 66.



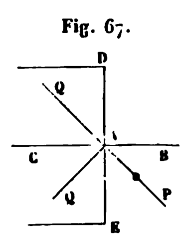
$$A + h' = A + B + h, \quad h = h' - B;$$

le liquide sera déprimé dans le tube d'une quantité B.

On vient d'expliquer les changements de niveau par la forme de la surface; il reste à expliquer pourquoi celle-ci est quelquefois concave et quelquefois convexe.

Explication de la forme des surfaces. — Quand on plonge dans un liquide BAE (*fig.* 67) une lame verticale indéfinie CDE d'un solide quelconque, la molécule liquide A éprouve de la part du liquide BAE une attraction P dirigée suivant la bissectrice de l'angle EAB. Elle est également attirée par les portions CAD, CAE du solide, ce qui donne deux forces égales Q inclinées à 45 degrés de CA. Ces trois forces se réduisent à une action verticale P cos 45°, qui s'ajoute à la pesanteur, et à une composante horizontale qui est (2Q — P) cos 45°. Trois cas peuvent se présenter.

Fig. 67.



1° Si 2Q — P > 0, la molécule A sera soumise à deux forces dirigées l'une suivant AE, l'autre suivant AC, qui produiront une résultante unique AR placée dans l'angle CAE (*fig.* 68). Et comme la surface d'équilibre des liquides est toujours normale à la direction des forces qui sollicitent ses molécules, elle sera perpendiculaire à AR suivant MN, elle fera

avec la lame solide un angle DAN qui sera constant pour les mêmes substances et que l'on nomme *angle de raccordement*. Les molécules plus

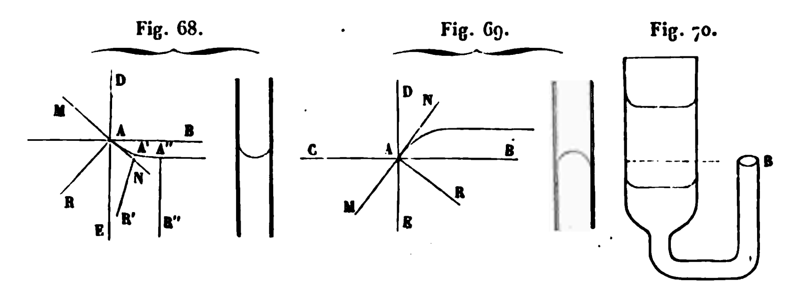


Fig. 68. Fig. 69. Fig. 70.

éloignées A', A'' éprouveront des actions plus faibles, et les forces R', R'' se rapprocheront de la direction verticale. La surface d'équilibre AA'A'' sera donc courbe, et redeviendra horizontale à une certaine distance de DE. Dans un tube, elle sera concave, et l'on peut admettre qu'elle se confondra avec une portion de sphère.

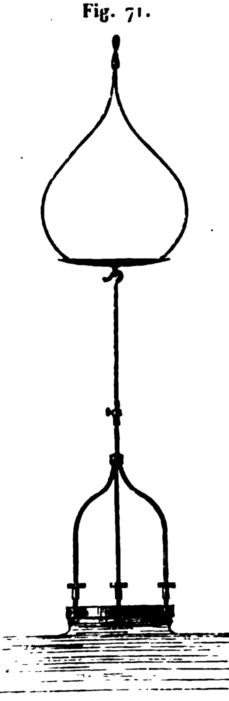


Fig. 71.

2° Quand $2Q - P = 0$, la résultante générale est verticale, et le liquide demeure horizontal au contact du solide.

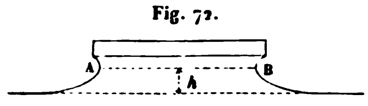
3° Lorsque $2Q - P < 0$, la résultante R se trouvera en composant deux forces dirigées suivant AB et AE (*fig.* 69); elle sera dans l'angle BAE; la surface terminale sera tangente au plan MN et convexe au voisinage de la paroi.

Pour vérifier ces explications, versons de l'eau goutte à goutte par la branche large d'un vase communiquant (*fig.* 70), jusqu'à amener le liquide dans la branche étroite à l'extrémité B. Sa forme y devient successivement concave, plane et convexe, son niveau étant supérieur, égal ou inférieur à celui de la grande branche; les trois cas de la capillarité se succèdent ainsi dans le même appareil et avec le même liquide.

Si l'on fait adhérer à la surface d'un liquide un disque de verre (*fig.* 71) suspendu au plateau d'une balance, et qu'on

le soulève ensuite par des poids placés de l'autre côté, on voit le... avec lui. La pression dans tous les points d'un plan AB me... teur h (*fig.* 72) sera é... A étant la pression ext... faudra donc qu'elle ... même quantité h sur ... en A et B, ce qui exige que la surface soit concave, que la pr... A — B et qu'on ait

Fig. 72.



$$A - h = A - B.$$

Quand on augmente les poids, la gorge se creuse de plus en ... haut, et bientôt le liquide se détache.

Lois numériques. — Soit ABCD (*fig.* 73) un tube capillaire da... liquide s'élève jusqu'en AB. Les parties supérieures du tube ex... les molécules liquides une attraction pQ proporti... périmètre intérieur p. L'attraction de la partie ... liquide intérieur sera sans influence à cause de la ... Enfin, les molécules du tube placées au-dessus de ... ront les parties du liquide situées au-dessous dans ... ment du canal, avec une force qui sera encore pQ... sollicitera donc le liquide de bas en haut avec u... tale $2pQ$. Mais, d'un autre côté, on peut se figurer ... liquide CDMN prolongeant le tube de verre, et les ... contenues dans l'épaisseur de ce tube attireront celle... ferment les parties supérieures du canal avec une ... En définitive, $p(2Q - P)$ sera l'expression de la force ... lèvera le liquide, et suivant que $2Q - P$ sera posit... négatif, il y aura élévation, niveau égal ou depress... Cette force est égale au poids sdh de la colonne liq... levée ou abaissée dont la section est s, la hauteur h et la densité d, et

Fig 73.

$$p(2Q - P) = shd, \quad h = \frac{p}{s}\,\frac{2Q - P}{d}.$$

Si le tube est cylindrique, le périmètre est égal à $2\pi r$, la section à πr^2 ...

$$h = \frac{2}{r}\,\frac{2Q - P}{d},$$

ce qui veut dire que :

L'ascension ou la dépression d'un même liquide dans des tubes de ... , mais de diamètres inégaux, est en raison inverse du rayon du tube.

Cette loi a été vérifiée par des expériences nombreuses.

CHAPITRE III.

ACTION DE LA PESANTEUR ET DE LA PRESSION SUR LES GAZ.

PROPRIÉTÉS COMMUNES AUX LIQUIDES ET AUX GAZ. — AÉROSTATS.

ɔus avons montré précédemment : 1° que les liquides sont extrême-t mobiles; 2° qu'ils sont compressibles et élastiques. De ces deux pro-tés fondamentales nous avons déduit d'abord les hypothèses que l'on tes pour expliquer leur constitution moléculaire et ensuite les lois de ·ansmission des pressions dans leur intérieur. Or ces propriétés se ɔuvent dans les gaz. La mobilité de leurs molécules constitue en effet caractère le plus apparent, et leur compressibilité se constate par ɪérience suivante.

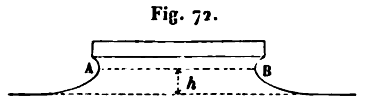
renons un cylindre de verre fermé par un bout, plaçons-le verticalement une table, engageons dans l'ouverture supérieure un piston terminé une poignée, et chargeons-le d'un poids; ce piston s'enfonce dans l'in-ɔur d'autant plus profondément que l'effort exercé est plus grand; mais nême temps le gaz résiste de plus en plus à mesure qu'il se comprime antage, et bientôt il fait équilibre aux poids. Il se détend ensuite et re-nd son premier volume, quand on rend la liberté au piston.

ɹes propriétés fondamentales des liquides, la mobilité, la compres-.lité et l'élasticité, se retrouvant dans les gaz, nous sommes autorisés n tirer les mêmes conséquences et à considérer ceux-ci comme formés molécules non adhérentes, tenues à des distances égales, pouvant se ɪprocher ou s'éloigner quand on augmente ou qu'on diminue la pres-n extérieure, se repoussant mutuellement et également dans tous les ɪs, réagissant enfin sur les parois des vases qui les renferment comme le t les molécules des liquides. De cette identité dans la constitution des ɪx classes de corps découlent nécessairement les mêmes propriétés, et ɪs pouvons les admettre sans en répéter la démonstration :

1° Un élément de surface au milieu d'un gaz ou sur la paroi du vase

le soulève ensuite par des poids placés de l'autre côté, on voit l'eau s'é avec lui. La pression dans tous les points d'un plan AB mené à la

Fig. 72.



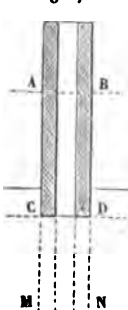
teur h (*fig.* 72) sera égale à A - A étant la pression extérieur faudra donc qu'elle diminue même quantité h sur le co en A et B, ce qui exige que la surface soit concave, que la pression s A — B et qu'on ait

$$A - h = A - B.$$

Quand on augmente les poids, la gorge se creuse de plus en plus v haut, et bientôt le liquide se détache.

Lois numériques. — Soit ABCD (*fig.* 73) un tube capillaire dans le liquide s'élève jusqu'en AB. Les parties supérieures du tube exerceront les molécules liquides une attraction pQ proportionnelle périmètre intérieur p. L'attraction de la partie ABCD sur liquide intérieur sera sans influence à cause de la sym. Enfin, les molécules du tube placées au-dessus de CD soll ront les parties du liquide situées au-dessous dans le prolon ment du canal, avec une force qui sera encore pQ. Le sollicitera donc le liquide de bas en haut avec une for tale $2pQ$. Mais, d'un autre côté, on peut se figurer un liquide CDMN prolongeant le tube de verre, et les molé contenues dans l'épaisseur de ce tube attireront celles que ferment les parties supérieures du canal avec une force En définitive, $p(2Q - P)$ sera l'expression de la force qui lèvera le liquide, et suivant que $2Q - P$ sera positif, nu négatif, il y aura élévation, niveau égal ou dépression.

Fig. 73.



Cette force est égale au poids sdh de la colonne liquide s levée ou abaissée dont la section est s, la hauteur h et la densité d, et l'on a

$$p(2Q - P) = shd, \quad h = \frac{p}{s}\,\frac{2Q - P}{d}.$$

Si le tube est cylindrique, le périmètre est égal à $2\pi r$, la section à πr^2, et l'on

$$h = \frac{2}{r}\,\frac{2Q - P}{d},$$

ce qui veut dire que :

L'élévation ou la dépression d'un même liquide dans des tubes de même na- ture, mais de diamètres inégaux, est en raison inverse du rayon du tube.

Cette loi a été vérifiée par des expériences nombreuses.

CHAPITRE III.

ACTION DE LA PESANTEUR ET DE LA PRESSION SUR LES GAZ.

I. — PROPRIÉTÉS COMMUNES AUX LIQUIDES ET AUX GAZ. — AÉROSTATS.

Nous avons montré précédemment : 1° que les liquides sont extrêmement mobiles; 2° qu'ils sont compressibles et élastiques. De ces deux propriétés fondamentales nous avons déduit d'abord les hypothèses que l'on a faites pour expliquer leur constitution moléculaire et ensuite les lois de la transmission des pressions dans leur intérieur. Or ces propriétés se retrouvent dans les gaz. La mobilité de leurs molécules constitue en effet leur caractère le plus apparent, et leur compressibilité se constate par l'expérience suivante.

Prenons un cylindre de verre fermé par un bout, plaçons-le verticalement sur une table, engageons dans l'ouverture supérieure un piston terminé par une poignée, et chargeons-le d'un poids; ce piston s'enfonce dans l'intérieur d'autant plus profondément que l'effort exercé est plus grand; mais en même temps le gaz résiste de plus en plus à mesure qu'il se comprime davantage, et bientôt il fait équilibre aux poids. Il se détend ensuite et reprend son premier volume, quand on rend la liberté au piston.

Les propriétés fondamentales des liquides, la mobilité, la compressibilité et l'élasticité, se retrouvant dans les gaz, nous sommes autorisés à en tirer les mêmes conséquences et à considérer ceux-ci comme formés de molécules non adhérentes, tenues à des distances égales, pouvant se rapprocher ou s'éloigner quand on augmente ou qu'on diminue la pression extérieure, se repoussant mutuellement et également dans tous les sens, réagissant enfin sur les parois des vases qui les renferment comme le font les molécules des liquides. De cette identité dans la constitution des deux classes de corps découlent nécessairement les mêmes propriétés, et nous pouvons les admettre sans en répéter la démonstration :

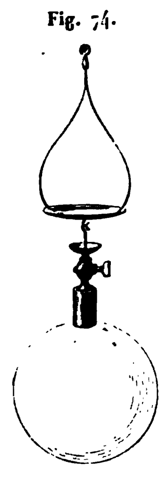
1° Un élément de surface au milieu d'un gaz ou sur la paroi du vase

sera soumis à des pressions normales, indépendantes de sa directi- du lieu qu'il occupe;

2° Si l'on comprime un gaz, son volume diminue jusqu'au moment réaction élastique est devenue égale à la pression exercée; alors pression a été transmise également sur des surfaces planes égales, et portionnellement à leur étendue si elles sont inégales.

Poids des gaz. — Les liquides avaient encore une autre propriété d'être pesants; nous allons montrer par une expérience qu'il en est même des gaz. Faisons le vide dans un ballon de verre de 5 à 10 litres capacité, muni d'un robinet, et suspendons-le à une balance en l'équili- par une tare (*fig.* 74). Au moment où nous ouvrirons le robinet, entendrons l'air rentrer en sifflant, nous verrons le lon baisser, et le poids augmentera de $1^{gr},293$ par de capacité. L'air est donc pesant : tous les gaz le et leur poids, comme celui des liquides, déterminera pressions dans leur intérieur. Considérons en partic l'atmosphère.

Fig. 74.

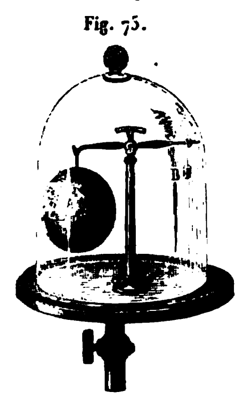


L'atmosphère est une masse d'air qui s'élève au-des du sol à une hauteur que l'on évalue approximati- ment à une trentaine de lieues; on la suppose termi par une dernière couche de niveau sans pression. partage le mouvement de rotation du globe et reste relativement immobile par rapport aux objets terrestr sans des variations de température qui produisent vents et qui font à chaque moment varier son équilibr Négligeons ces perturbations qui sont minimes, et con- sidérons l'atmosphère comme une mer fluide en équi- libre, couvrant la terre jusqu'à un niveau fixe. Décomposons-la en tranc horizontales minces : elles représenteront autant de pistons superp qui pressent les uns sur les autres. Alors la pression s'accroît de haut bas. Dans une couche quelconque, elle agit également sur toutes les sur- faces égales, qu'elles soient horizontales, verticales ou inclinées, et chaque élément la pression sera égale au poids d'une colonne gazeuse qu aurait cet élément pour base et s'étendrait jusqu'à la limite de l'atmo- sphère. Elle doit être la même dans les chambres qu'à l'air libre, et sera constante sans les variations d'équilibre que nous avons négligées.

Principe d'Archimède. — Les pressions exercées sur tous les éléments d'un corps plongé dans l'air se composeront en une résultante, la poussée égale au poids du fluide déplacé et appliquée de bas en haut au centre de

gravité du corps. C'est le principe d'Archimède. Prenons une petite balance (*fig.* 75) dont le fléau soutient à l'un des bouts un ballon de cuivre fermé A, et à l'autre une petite balle pleine B de même poids. Après avoir établi l'équilibre dans l'air, on place l'appareil sous la cloche d'une machine pneumatique et on y fait progressivement le vide.

Fig. 75.



On constate que la grosse sphère devient progressivement plus lourde. C'est qu'en effet A et B gagnent tous deux dans le vide le poids qu'ils avaient perdu dans l'air : B le poids d'un petit volume d'air, A celui d'un volume plus grand. C'est pourquoi A s'abaisse.

Aérostats. — Soit d' la densité d'un corps de volume v, son poids sera vd' dans le vide, il sera $vd' - vd$ dans l'air, d étant la densité de cet air par rapport à l'eau. Si d' est plus grand que d, le corps tombera; si d' est plus petit que d, il s'élèvera.

C'est le cas des ballons qu'on remplit d'air dilaté, d'hydrogène, de gaz d'éclairage, etc. Ils sont sollicités par une force dirigée de bas en haut et égale à $v(d - d')$. Quand ils sont sphériques, cette force est exprimée par $\frac{4}{3}\pi r^3(d - d')$. Elle entraîne le poids de l'enveloppe, des agrès et de la nacelle avec les personnes qu'elle contient. Soit p ce poids; en le retranchant de $v(d - d')$ on aura la *force ascensionnelle* du ballon. Pour la calculer, on exprimera r en décimètres et on remplacera d et d' par leurs valeurs, qui sont, à zéro et sous la pression de 760 millimètres :

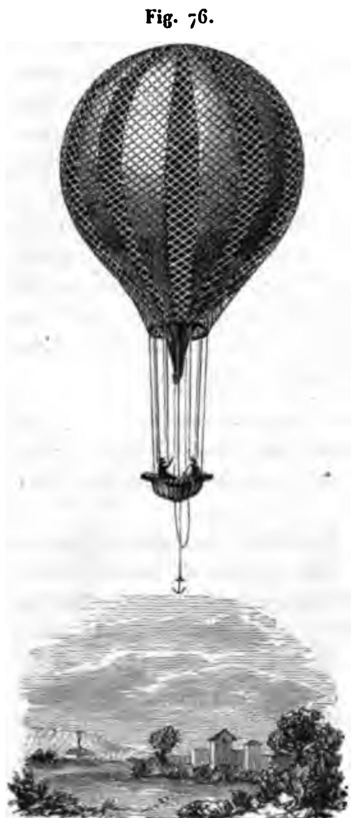
$d = 0{,}001\,293$ pour l'air;
$d' = 0{,}000\,090$ pour l'hydrogène;
$d' = 0{,}000\,815$ pour le gaz d'éclairage.

Autrefois on remplissait à grands frais les ballons avec de l'hydrogène préparé chimiquement; aujourd'hui on préfère utiliser le gaz de l'éclairage. A la vérité, il est moins léger que l'hydrogène et la force ascensionnelle est diminuée; mais il est beaucoup moins cher.

Le premier ballon aérostatique a été construit par les frères Étienne et Joseph Montgolfier, en 1783. Il était en toile doublée de papier; on le gonflait par l'air chaud, en allumant au-dessous de son orifice inférieur un feu de paille. Depuis cette époque, on appelle *montgolfières* les ballons à air chaud, pour les distinguer des aérostats à gaz froids. C'est le physicien

Charles qui a employé le premier le gaz hydrogène, et c'est Pilatre du Ro-zier qui exécuta la première ascen-sion. La plus grande hauteur à la-quelle on s'est élevé par ce moyen est de 9 kilomètres (M. Glaisher, en 1864).

Fig. 76.



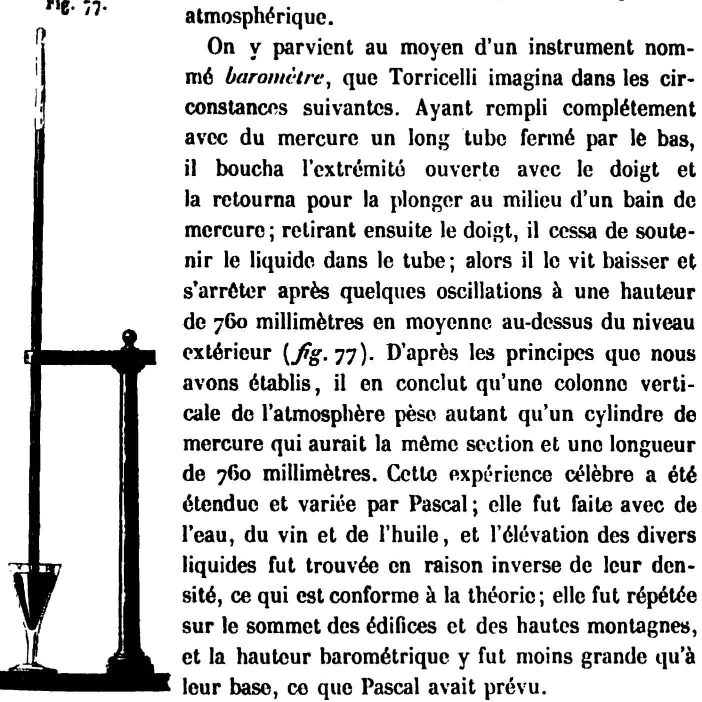
L'enveloppe d'un ballon se compose ordinairement de longs fuseaux de taffetas cousus ensemble et qu'on enduit d'un vernis de caoutchouc (*fig.* 76). Au sommet se trouve une soupape qui est fermée par un ressort à boudin et que l'aéronaute ouvre en tirant une corde, pour donner issue à une partie de son gaz, lorsqu'il veut se rapprocher de la terre. Pour ralentir la descente ou pour remonter, il jette du lest, c'est-à-dire vide des sacs pleins de sable dont il s'est muni avant le départ.

La nacelle, qui est faite en osier, s'attache à un filet de corde qui enveloppe le ballon tout entier. L'orifice inférieur reste toujours ouvert; le gaz, étant plus léger que l'air, ne s'en échappe pas. On gonfle l'aérostat en y faisant arriver le gaz par un tuyau de conduite qui s'adapte à l'orifice inférieur; mais on évite de le gonfler entièrement parce que le gaz se dilate à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère et que la pression extérieure diminue.

II. — MESURE DE LA PRESSION ATMOSPHÉRIQUE.

Nous avons vu que le poids des couches supérieures de l'air doit exercer des pressions dans l'atmosphère : on les exprimera en chaque point sur un centimètre carré par le poids $h \times 13^{gr},59$ d'une colonne de mercure de h centimètres, ou, comme cela a déjà été convenu page 54, on

contentera de dire que la pression est égale à h. Il nous reste à déterminer cette hauteur h qui représente la pression atmosphérique.


Fig. 77.

On y parvient au moyen d'un instrument nommé *baromètre*, que Torricelli imagina dans les circonstances suivantes. Ayant rempli complétement avec du mercure un long tube fermé par le bas, il boucha l'extrémité ouverte avec le doigt et la retourna pour la plonger au milieu d'un bain de mercure; retirant ensuite le doigt, il cessa de soutenir le liquide dans le tube; alors il le vit baisser et s'arrêter après quelques oscillations à une hauteur de 760 millimètres en moyenne au-dessus du niveau extérieur (*fig.* 77). D'après les principes que nous avons établis, il en conclut qu'une colonne verticale de l'atmosphère pèse autant qu'un cylindre de mercure qui aurait la même section et une longueur de 760 millimètres. Cette expérience célèbre a été étendue et variée par Pascal; elle fut faite avec de l'eau, du vin et de l'huile, et l'élévation des divers liquides fut trouvée en raison inverse de leur densité, ce qui est conforme à la théorie; elle fut répétée sur le sommet des édifices et des hautes montagnes, et la hauteur barométrique y fut moins grande qu'à leur base, ce que Pascal avait prévu.

Construction du baromètre. — On choisit un tube de verre ou de cristal bien droit, régulier dans toute sa longueur et exempt de bulles ou de stries. On le lave à l'acide azotique bouillant, on le rince avec de l'eau distillée, on le sèche, on ferme un des bouts à la lampe, et l'on souffle à l'autre extrémité une ampoule. On l'emplit ensuite avec du mercure qu'on a purifié en le traitant par l'acide azotique. Il n'y a plus qu'à chasser l'air et l'humidité qui adhèrent au verre. Pour cela, on couche le tube sur un gril incliné (*fig.* 78) où il est entouré de charbons allumés qui élèvent sa température à 300 degrés environ. A la partie inférieure, on amasse un petit tas de charbons rouges, qui font bientôt bouillir le mercure. Au bout de cinq minutes environ, on enlève un à un les charbons qui sont à la base du tas pour les porter à son sommet, ce qui transporte l'ébullition plus haut, et en continuant ce déplacement tout le long du tube, on chasse tout ce qui restait d'air et d'humidité. Après le refroidissement on coupe

l'ampoule, on achève de remplir avec du mercure sec et chaud, jus-
ce que le sommet liquide dépasse les bords du tube par un bouton


Fig. 78.



vexe; on ferme avec le doigt en écrasant le bouton, et l'on retourne l'ap-
pareil pour le plonger dans une cuvette.

Baromètre fixe. — Si le baromètre ne doit pas être déplacé, on em-
ploie pour cuvette une auge de fonte (*fig.* 79) fixée con-
une planche épaisse scellée dans le mur, on soutient
tube au moyen de cales B, C, et les mesures des haut-
sont prises avec un cathétomètre. On relève le niveau de
la cuvette par une vis verticale à deux pointes A, qu
abaisse peu à peu jusqu'à voir en contact la pointe inf-
rieure et son image réfléchie par le mercure; alors on
avec le cathétomètre le niveau du mercure dans le tu
puis la pointe supérieure de la vis, et, pour avoir la h-
teur cherchée, on ajoute à la course de la lunette la lo-
gueur de la pointe affleurante, qui est constante, et qu
été mesurée une fois pour toutes.

Fig 79.



Baromètre de Fortin. — Pour rendre le baromètr
portatif, Fortin a imaginé de fermer la cuvette (*fig.* 80
1° par un couvercle de bois doublé de cuivre *CC*, sur-
monté d'un tube central BB pour laisser passer le baro-
mètre; 2° par une lanterne cylindrique de verre *DD* ma-
tiquée à ses deux bouts, et maintenue par trois tiges de
cuivre à vis CGCH; 3° par un cylindre de buis MNMN qu
est composé de deux bagues vissées l'une sur l'autre, la
première MM fixée à l'enveloppe, et la deuxième NN qu
peut se démonter et qui se prolonge par un sac de peau

de chamois lié sur son contour. Ce sac est au fond de la cuvette, il soutient le mercure qu'elle contient, et il est lui-même appuyé sur l'extrémité d'une vis Q qui est portée par un tube extérieur EFGH. En élevant ou en abaissant la vis Q on fait monter ou descendre le fond mobile, et, par suite, on amène le niveau du mercure à l'extrémité d'une pointe d'ivoire A : c'est le zéro.

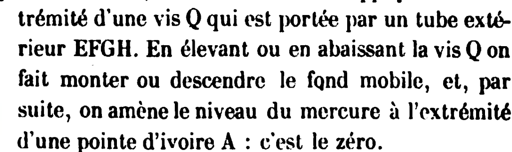


Fig. 80.

Une pièce de peau de chamois, liée d'une part sur le tube et de l'autre sur le prolongement BB, fixe le tube à la cuvette, laisse pénétrer l'air, mais empêche le mercure de sortir. Le tube est couvert d'une enveloppe de cuivre, vissée en BB, et portant la division dont le zéro correspond à la pointe d'ivoire. Dans le haut, elle est coupée longitudinalement par deux fentes opposées, à travers lesquelles on voit le sommet du mercure; on mesure sa hauteur par un vernier D (*fig.* 81) que l'on fait monter ou descendre au moyen d'un pignon C le long d'une crémaillère. On voit (*fig.* 82) le détail des pièces qui composent la cuvette, dans la situation où elles sont lorsqu'on veut la remplir et la joindre au baromètre.



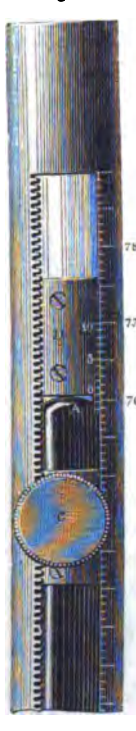
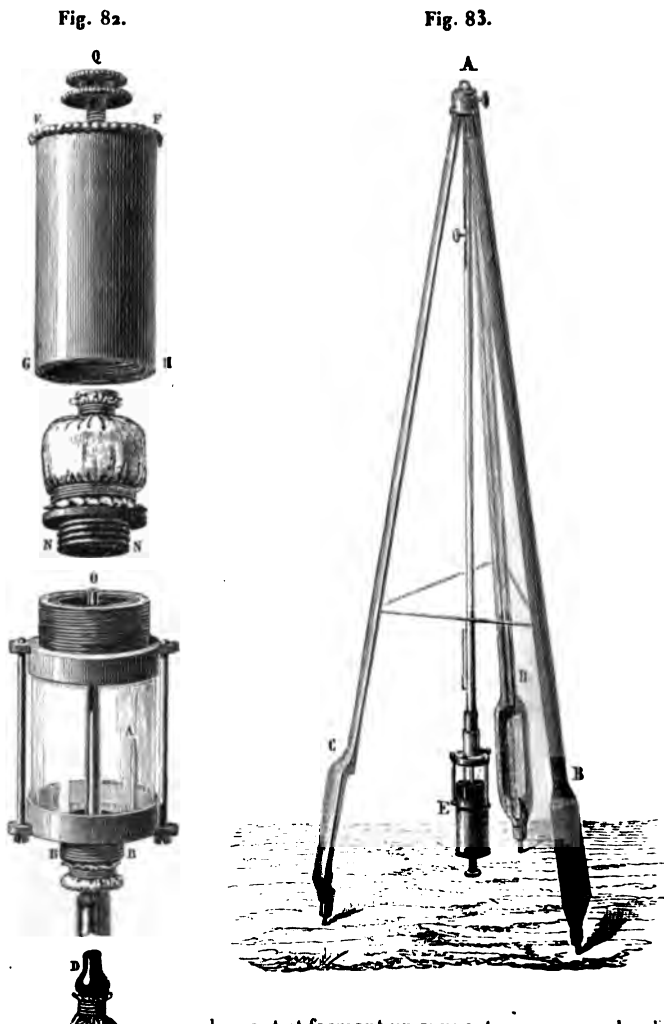


Fig. 81.

Quand on veut transporter ce baromètre, on soulève peu à peu la vis Q; alors le mercure s'élève dans la cuvette qu'il remplit d'abord en chassant à travers la peau de chamois l'air qu'elle contenait, puis il monte dans le tube jusqu'au sommet, et aussitôt qu'il y arrive, l'opérateur en est averti par la résistance subite que la vis oppose. On est alors assuré que le mercure ne peut plus éprouver de ballottement, que l'introduction de l'air est devenue impossible, et on peut sans aucun danger incliner, renverser ou agiter l'instrument sans avoir aucune altération ni aucune rupture à redouter. On peut alors enfermer le baromètre dans une

canne creuse (*fig.* 84); elle se divise en trois parties articulées qui se dé-

Fig. 82. Fig. 83.



loppent et forment un support pour accrocher l'instrument au moyen d'une suspension à la Cardan.

Tel qu'il vient d'être décrit, le baromètre de Fortin offre plusieurs avantages. Le niveau extérieur y étant ramené à une hauteur constante, »

n'y a qu'une seule observation à faire. Mais ce qui est surtout important, c'est que la disposition des différentes pièces rend à peu près impossibles les accidents auxquels on s'expose lorsqu'on veut transporter un baromètre ordinaire. Le baromètre de Fortin est donc parfaitement approprié aux besoins des voyageurs.

Baromètre de Gay-Lussac et de Bunten. — Au lieu de plonger le tube dans une cuvette séparée, on peut le recourber en forme de siphon. Guy-Lussac le construit ainsi. Il choisit un tube bien cylindrique, qui est coupé en deux parties : l'une AB (*fig.* 84) qui formera le haut du baromètre, l'autre CD dont on fera la cuvette. On les réunit par un tube capillaire EF, un peu rejeté sur le côté, de façon que AB et CD, la colonne et la cuvette, soient dans le prolongement l'un de l'autre. La pression s'exerce par un trou percé à l'extrémité d'une pointe rentrante C que l'on obtient en repoussant de l'extérieur à l'intérieur le verre du tube ramolli à la lampe. Les deux niveaux étant en M et en N au moment d'une observation, il est évident que l'action capillaire se détruit, si la forme des deux ménisques est la même.

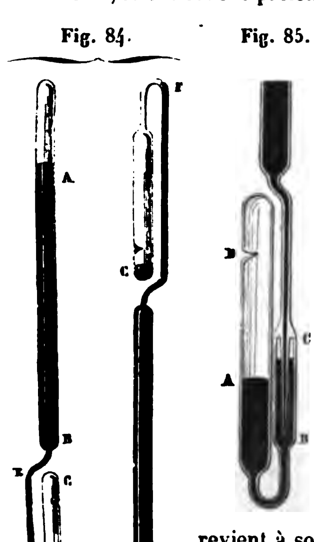


Fig. 84. Fig. 85.

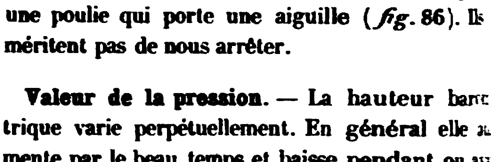
L'appareil peut d'ailleurs se transporter aisément. Pour cela, on l'incline, il s'emplit lentement, puis on le renverse, et le mercure se partage en deux parts : l'une qui se maintient en PA, l'autre qui tombe au fond de la cuvette en C au-dessous de la pointe rentrante. En cet état, l'instrument n'éprouve aucune secousse pendant les transports, et, si on le redresse, il revient à son état premier.

Bunten a disposé sur le trajet du conduit capillaire un espace dilaté CB (*fig.* 85), dans lequel le tube supérieur se prolonge. S'il arrive qu'une bulle d'air s'engage dans la colonne, elle vient se loger dans l'intervalle compris entre la pointe et le tube extérieur. Néanmoins ces appareils sont défectueux parce que le mercure de la cuvette s'altère rapidement, et qu'alors les deux ménisques prennent des courbures différentes.

On construit encore, pour l'ornement des maisons, des baromètres à

cadran, où le mouvement du mercure se transmet par un contre-poids une poulie qui porte une aiguille (*fig.* 86). Ils ne méritent pas de nous arrêter.

Fig. 86.



Valeur de la pression. — La hauteur barométrique varie perpétuellement. En général elle augmente par le beau temps et baisse pendant ou avant la pluie. Cela tient à des mouvements de l'atmosphère que nous étudierons dans la suite. En moyenne, au niveau de la mer et à la latitude de 45 degrés, la hauteur h est égale à 760 millimètres. La pression sur 1 centimètre carré est donc $76 \times 13,59 = 1033$ grammes, ou environ 1 kilogramme par centimètre carré.

Cette pression moyenne de l'atmosphère est souvent prise comme unité de mesure. On dit qu'une pression est égale à 2, 3, 4 atmosphères pour indiquer qu'elle est équilibrée par des hauteurs de mercure égales à 2, 3, 4 fois 760 millimètres, ou qu'elle est égale à 2, 3, 4 fois 1033 grammes par centimètre carré.

Corrections. — La capillarité déprimant le mercure dans les tubes étroits diminue la hauteur barométrique. La dépression dépend de la courbure terminale, et celle-ci varie avec les divers instruments. On a construit des Tables pour tous les cas. La suivante donne la hauteur moyenne qu'il faut ajouter à celle qu'on a observée :

Rayon du tube.	Dépression.	Rayon du tube.	Dépression.
mm	mm	mm	mm
2	1,635	7	0,117
3	0,909	8	0,070
4	0,538	9	0,041
5	0,322	10	0,025
6	0,195		

La hauteur mesurée est H à la température de t degrés ; mais la division, qui était exacte à zéro, est dilatée à $t°$, et le nombre de millimètres H vaut en réalité $H(1+ct)$, c étant le coefficient de dilatation de l'échelle. En second lieu, le mercure a une densité moindre à $t°$ qu'à zéro, et la colonne H équivaut à une hauteur $\frac{H}{1+mt}$ de mercure à zéro, m étant la dilatation du mercure pour 1 degré. La vraie hauteur sera donc $H\frac{1+ct}{1+mt}$, ou bien approximativement

$$H(1-0,00016 \cdot t).$$

En général, l'observation est faite à une altitude h au-dessus du niveau de la mer, et comme à ce niveau et à la latitude de 45 degrés la pesanteur serait g' au lieu de g, la hauteur du mercure varierait inversement. Il faut donc encore, pour réduire la hauteur barométrique H au niveau de la mer et à la latitude de 45 degrés, conformément à la formule de la page 16, la multiplier par

$$(1 - 0,00255 \cos 2\lambda)\left(1 - \frac{2h}{R}\right).$$

Hypsométrie. — On se sert du baromètre pour mesurer les hauteurs. Plus on s'élève, plus H est petit, et l'on démontre que, si l'on désigne par H et H' les hauteurs du mercure à deux stations, par z la différence de leurs niveaux, par λ la latitude moyenne et par T et T' les températures de l'air aux deux stations,

$$z = 18405^{m}(1 + 0,00255 \cos 2\lambda)\left[1 + \frac{2(T + T')}{1000}\right] \log \frac{H}{H'}.$$

Cette formule est due à Laplace. On a calculé des Tables qui en facilitent l'application.

III. — DE L'ÉLASTICITÉ DANS LES GAZ.

Les gaz possèdent une compressibilité considérable qui les distingue des liquides. La loi de cette compressibilité, découverte par Mariotte, s'énonce ainsi :

Les volumes V *et* V' *occupés par une même masse de gaz à une température constante sont en raison inverse des pressions* P *et* P' *qu'ils supportent :*

$$\frac{V}{V'} = \frac{P'}{P}.$$

Cette relation pouvant se mettre sous la forme VP = V'P', on remarque que :

Le produit du volume d'une masse de gaz par sa pression est constant.

Les volumes occupés par une même masse étant en raison inverse de ses densités, on peut encore écrire

$$\frac{d'}{d} = \frac{P'}{P}:$$

Les densités des gaz sont proportionnelles aux pressions qu'ils éprouvent.

Expériences de Mariotte. — Pour démontrer la loi de Mariotte, on fixe sur une planche verticale un long tube de verre (*fig.* 87), ouvert à sa partie supérieure C, recourbé par le bas et terminé par une branche verticale fermée en A. On commence par y verser une petite quantité de

mercure qui se loge en OO et qui isole de l'atmosphère l'air contenu dans la branche fermée. Dans cet état initial le volume se mesure par une graduation faite à l'avance sur le tube AO, et la pression est celle de l'atmosphère, qui se transmet par le mercure. On verse ensuite de nouvelles quantités de mercure par l'entonnoir C. Quand la différence des niveaux dans les deux branches est devenue égale à la hauteur barométrique, le gaz éprouve une pression double, égale à 2 atmosphères, et l'on reconnaît qu'il occupe un volume moitié moindre AB. En continuant d'ajouter du mercure jusqu'à produire des différences de niveau égales à 2, 3, 4,... fois la hauteur du baromètre, c'est-à-dire des pressions égales à 3, 4, 5,... atmosphères, on trouve que les volumes successifs du gaz sont $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{5}$, ... du volume occupé sous la pression de l'atmosphère.

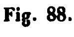


Fig. 88.

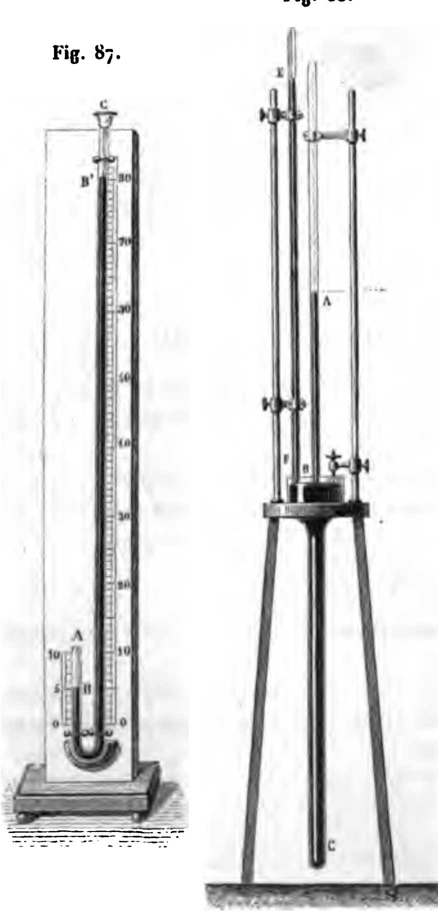


Fig. 87.

Quand les pressions, au lieu d'augmenter, deviennent de plus en plus faibles, la loi se justifie encore.

Pour le prouver, on introduit le gaz dans un baromètre AB (*fig.* 88) qui plonge dans une longue cuvette BC, où on peut l'enfoncer et l'élever. A côté est un autre baromètre immobile EF. Avant l'introduction du gaz, le mercure se soutient dans le tube à la hauteur barométrique E; après cette introduction, il s'abaisse jusqu'en A d'une quantité AE qui mesure la pression P; le volume V du gaz est donné par une

ision tracée sur le tube AB. On trouve que le produit VP reste con-
nt.

Expériences de Despretz et de M. Regnault. — Après le premiers
vaux de Mariotte et de Boyle, un très-grand nombre d'expérimentateurs
ont cherché si tous les gaz suivaient la loi jusqu'aux plus hautes
pressions. Despretz plongeait dans une cuvette commune pleine
de mercure (*fig.* 89) divers tubes cylindriques de même hau-
teur, contenant les gaz qu'il voulait étudier, et il enfermait cet
appareil dans un vase de verre qui était plein d'eau et qui se
fermait par un piston à vis qu'on abaissait progressivement.
La pression augmentait, le niveau du mercure montait dans
chaque tube, mais il montait inégalement. L'acide carbonique,
l'hydrogène sulfuré, l'ammoniaque et le cyanogène se compri-
maient plus que l'air. L'hydrogène se conduisit comme l'air
jusqu'à 15 atmosphères; à des pressions plus élevées, il con-
serva un volume plus grand; il se comprimait moins.

ig. 89.



Ces résultats prouvent que la formule énoncée par Mariotte n'est pas
nérale, et que chaque gaz possède une loi spéciale de compressibilité
'il fallait déterminer. C'est ce que fit M. Regnault.

Un long manomètre ABCDE (*fig.* 90) se compose de deux branches, dont
ne DE est ouverte et appliquée sur un madrier. Cette branche, pour s'élever
o mètres environ, est formée de tubes de cristal raccordés entre eux par
s viroles et divisés en millimètres sur toute leur longueur. Un siége qui
grenait par un pignon avec une longue crémaillère et s'élevait ou descen-
it le long d'un mât transportait l'observateur aux points où s'était arrêté
sommet du mercure. L'autre branche AC avait 3 mètres de longueur,
e était fermée par un robinet G. Sa capacité avait été divisée avec soin en
ux parties égales par le point B; ainsi le volume AC était double de AB.
La monture inférieure du manomètre se raccorde avec un réservoir de
nte F, rempli de mercure et surmonté d'une pompe foulante M. Celle-ci
end de l'eau dans un vase voisin et l'injecte sur le mercure, qu'elle
asse à la fois dans les deux branches du manomètre. Il s'élève librement
ns DE et comprime le gaz contenu dans AC; la différence de niveau,
gmentée de la hauteur barométrique, mesure la pression exercée par
gaz. Le robinet H sert à intercepter la communication avec la pompe
ulante, afin de maintenir constante la pression obtenue. Le réservoir I
ntient le gaz sec et comprimé à 20 atmosphères, sur lequel on veut
érer; on l'y introduit par le conduit J. Voici comment se font les expé-
ences.

En ouvrant le robinet G, on fait arriver du gaz dans la branche AC. Le mercure baisse et arrive en C; à ce moment, on ferme le robinet, et l'on

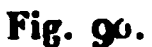


Fig. 90.



a, dans AC, un volume de gaz V à une pression initiale P mesurée par la hauteur du mercure dans DE. Alors on fait jouer la pompe M, le mercure s'élève dans le manomètre, monte jusqu'en B et réduit le volume initial du gaz à la moitié; à ce moment, on observe de nouveau la pression, qui est devenue P'.

Si la loi de Mariotte était vraie, P' serait double de P. Or, l'expérience prouve qu'elle est plus petite que 2P pour l'air, l'azote et l'acide carbonique, et que la différence est d'autant plus sensible que le gaz est plus aisément liquéfiable; d'où il suit que ces gaz sont plus compressibles que la loi de Mariotte ne l'indique. Les divergences augmentent avec la pression. L'hydrogène offre un résultat inverse : pour le réduire à la moitié de

›n volume primitif, il faut lui faire subir une pression plus grande que › double de la pression initiale. Il s'éloigne donc de la loi de Mariotte par ne compressibilité trop petite, et elle décroît à mesure que la pression ugmente. Aucun gaz connu ne suit exactement la loi de Mariotte.

Le tableau suivant exprime les pressions nécessaires pour réduire à $\frac{1}{5}$, $\frac{1}{0}$, $\frac{1}{15}$, $\frac{1}{20}$ de sa valeur primitive le volume d'un gaz, pris sous la pres-.on initiale de 1 mètre de mercure. Il montre clairement que la loi n'est as exacte, mais il montre aussi que, pour l'air et l'hydrogène, les diver-ences sont tellement petites, qu'on peut les négliger dans tous les pro-·lèmes qu'on aura à résoudre sur ces gaz, surtout quand les variations ›e pression ne sont pas considérables.

VOLUMES.	PRESSIONS.					
	AIR.	DIFFÉRENCE.	ACIDE CARBONIQUE.	DIFFÉRENCE.	HYDROGÈNE.	DIFFÉRENCE.
	m	m	m	m	m	m
1	1,0000	+ 0,0000	1,0000	+ 0,0000	1,0000	— 0,0000
$\frac{1}{5}$	4,9794	+ 0,0206	4,8288	+ 0,1722	5,0116	— 0,0116
$\frac{1}{10}$	9,9162	+ 0,0838	9,2262	+ 0,7738	10,0560	— 0,0560
$\frac{1}{15}$	14,8248	+ 0,1752	13,1869	+ 1,8131	15,1395	— 0,1395
$\frac{1}{20}$	19,7198	+ 0,2802	16,7054	+ 3,2946	20,2687	— 0,2687

En résumé, au point de vue pratique, la loi de Mariotte peut toujours ›tre adoptée; au point de vue théorique, il faut considérer les gaz comme soumis à des perturbations moléculaires inégales.

Mélange des gaz. — Jusqu'ici nous avons étudié l'effet des pressions sur un seul gaz; mais on peut aisément étendre la loi de Mariotte au cas de plusieurs gaz mélangés, quand ils n'exercent entre eux aucune action chimique. On se fonde sur une expérience de Berthollet. Deux ballons de capacité égale et pouvant se visser ensemble, avaient été remplis l'un d'acide carbonique, l'autre d'hydrogène à la même pression, puis réunis et placés l'un au-dessus de l'autre de manière que l'hydrogène, qui est le plus léger des deux gaz, fût au-dessus de l'acide carbonique, afin qu'ils ne pussent se déplacer par l'effet de leurs densités. Après quelques heures, la pression n'avait point changé, mais les deux gaz s'étaient uniformément répartis dans les deux vases, malgré la pesanteur qui devait les tenir séparés. On admet que chacun des deux gaz se répand dans tout l'espace

comme s'il était seul, qu'il prend une pression moitié moindre en dilatant dans un espace double, et que les pressions des deux gaz s'ajoutent. Ces résultats se généralisent comme il suit. Soient v, v', v''..., p, p', p'',..., les volumes et les pressions de plusieurs gaz que l'on conduit dans un volume unique V; chacun d'eux y acquerrait, s'il était seul, une force élastique $\frac{vp}{V}, \frac{v'p'}{V}, \frac{v''p''}{V}, \ldots$, et la somme de ces quantités sera la pression totale P du mélange, ce qui conduit à la relation générale

$$PV = vp + v'p' + v''p'', \ldots.$$

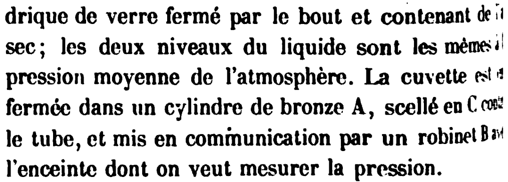
Ce mélange suit la loi de Mariotte dans la limite des pressions où elle est vraie pour chacun des gaz qui le composent.

IV. — APPLICATIONS DE LA LOI DE MARIOTTE.

Manomètres. — Les manomètres sont des instruments destinés à mesurer les pressions dans les gaz. Ils sont généralement composés d'une cuvette de verre (*fig.* 91) pleine de mercure où plonge un tube cylindrique de verre fermé par le bout et contenant de l'air sec; les deux niveaux du liquide sont les mêmes à la pression moyenne de l'atmosphère. La cuvette est enfermée dans un cylindre de bronze A, scellé en C contre le tube, et mis en communication par un robinet B avec l'enceinte dont on veut mesurer la pression.



Fig. 91.



On peut graduer un manomètre en le comparant avec un manomètre à air libre; on peut aussi le graduer par le calcul. A la pression initiale de l'atmosphère, le volume de l'air est égal à $\pi r^2 h$, en désignant par r et h le rayon et la hauteur du tube. A la pression de n atmosphères le mercure s'élève d'une quantité x et le volume se réduit à $\pi r^2 (h - x)$; mais en même temps le mercure s'abaisse de y dans la cuvette. x et y sont en raison inverse des sections du tube et de la cuvette, et si r et R sont leurs rayons, on a

$$\pi r^2 x = \pi (R^2 - r^2) y, \quad y = \frac{r^2}{R^2 - r^2} x.$$

D'un autre côté, la pression éprouvée par l'air est égale à la pression extérieure de n atmosphères, diminuée de la diffé-

ence de niveau $x+y$, c'est-à-dire à

$$n.760 - x - \frac{r^2}{R^2-r^2}x = n.760 - \frac{R^2}{R^2-r^2}x.$$

En écrivant maintenant que les volumes initial et final sont en raison inverse des pressions correspondantes, et en posant $\frac{1}{760}\frac{R^2}{R^2-r^2} = k$, on trouve

$$\frac{h}{h-x} = n - kx.$$

Cette équation est du second degré et, en la résolvant, on trouve

$$x = \frac{1}{2k}\left[n + kh \pm \sqrt{(n+kh)^2 - 4kh(n-1)}\right].$$

Fig. 92.

Une seule valeur de x convient à la question, c'est celle qui correspond au signe —, car il faut que x soit nul sous la pression d'une atmosphère, c'est-à-dire quand $n = 1$.

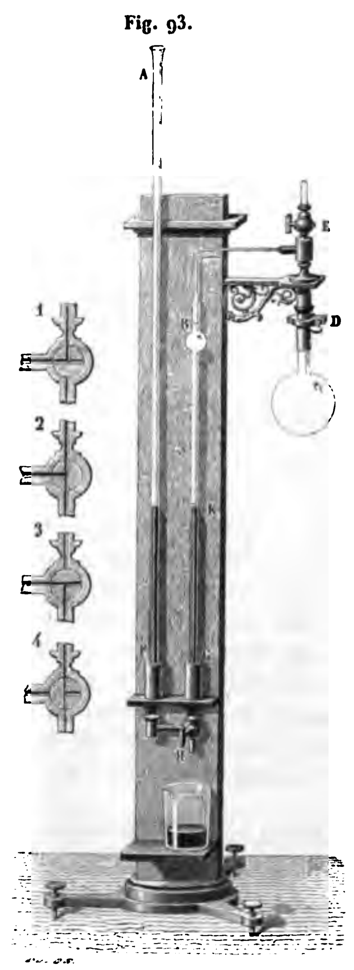
On donne quelquefois au manomètre la forme d'un siphon retourné (*fig.* 92). La branche ouverte reçoit la pression, et le tube fermé contient de l'air. Sous la pression initiale de 760 millimètres, le mercure est au même niveau AB dans les deux branches; quand la pression augmentera pour devenir égale à $n.760^{mm}$, le niveau baissera en A jusqu'en A′ et montera en BC jusqu'à B′ d'une même quantité x dans les deux branches; la formule précédente s'appliquera à ce nouveau cas en remplaçant $x+y$ par $2x$ et faisant $h = \frac{2}{760}$; elle devient

$$x = \frac{2h + n.760}{4} - \sqrt{\frac{(2h+n.760)^2}{16} - \frac{h(n-1)760}{2}}.$$

Voluménomètre. — Cet instrument sert à mesurer le volume, et par suite la densité des corps. C'est un manomètre dont les deux branches sont réunies (*fig.* 93) par l'intermédiaire d'un robinet à trois voies H. Suivant que l'on tourne celui-ci dans les positions 1, 2, 3, 4, on peut, 1° établir la communication entre ces tubes; 2° laisser écouler le mercure de A et de B; 3° de A seulement; 4° de B seulement.

On a marqué sur le tube fermé deux traits B et K. Si l'on amène d'a le mercure en B, qu'on le laisse é ler jusqu'en K et qu'on le pèse, pourra calculer le volume v comp entre B et K.

Fig. 93.



Le tube BK est relié avec un ba par un collier à gorge D. Pour tr ver le volume V compris entre ballon et le repère B, on empli tubes de mercure jusqu'en K sous pression atmosphérique H, on fer le robinet E et l'on ajoute du me cure en A jusqu'au moment ou niveau arrive en B; la pression au mente d'une quantité h que l'on m sure au cathétomètre, et le volu de l'air, qui d'abord était $V+v$ réduit à V. On a dès lors

$$(V+v)H = V(H+h), \quad V = v\frac{H}{h}$$

Si l'on veut maintenant mesurer volume x d'un corps, on le place da le ballon, ce qui diminue la capac totale de x; on répète l'opération q vient d'être décrite, on trouve de pressions H et $H+h'$, correspon dantes aux volumes $V+v-x$ e $V-x$, et l'on a

$$(V+v-x)H = (V-x)(H+h'),$$

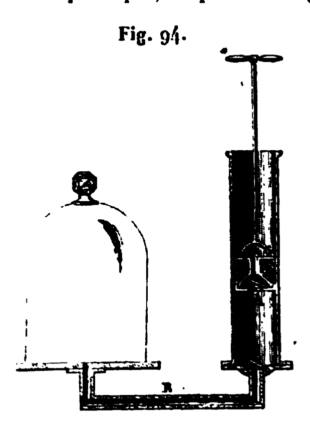
$$x = V - v\frac{H}{h'}.$$

V. — MACHINES A RARÉFIER ET A COMPRIMER LES GAZ.

Machine pneumatique. — La machine pneumatique est destinée à enl ver l'air que contient un espace donné. Elle se compose d'un cylindre cre (*fig.* 94) dans lequel s'élève ou s'abaisse un piston qui est percé d'un tr

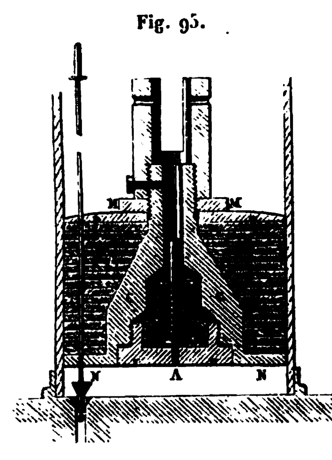
uni d'une soupape qui ouvre de bas en haut. A la base du cylindre une autre oupape B, dirigée dans le même sens, ouvre ou ferme un conduit R par lequel appareil communique avec le récipient dans lequel on veut faire le vide. uand on élève le piston, la soupape A se ferme par l'effet de la pression tmosphérique, l'espace AB augmente, la pression diminue, et l'air qui est dans le récipient soulève la soupape B pour pénétrer sous le piston. Quand on abaissera le piston, la soupape B commencera par se fermer, puis l'air compris entre le piston et cette soupape se comprimera et acquerra une élasticité supérieure à celle de l'atmosphère : alors il ouvrira la soupape A, s'échappera, et le piston reviendra se placer sur la base du cylindre dans la position qu'il occupait primitivement. On voit donc qu'en soulevant le piston d'abord et en l'abaissant ensuite on raréfie d'abord l'air du récipient et l'on en rejette ensuite une partie dans l'atmosphère ; et comme on eut continuer indéfiniment la même opération, il semble que l'on pourra iminuer indéfiniment la pression de l'air dans le réservoir.

Fig. 94.



Mais il n'en est pas précisément ainsi, car le gaz du récipient ne pourra ffluer dans le corps de pompe qu'en soulevant la soupape B, et la limite u vide sera atteinte aussitôt que l'élasticité de ce gaz sera devenue égale à la résistance de cette soupape B. Cette première imperfection de la machine primitive a nécessité des modifications dont nous allons donner une figure et une description détaillée (*fig.* 95).

Fig. 95.



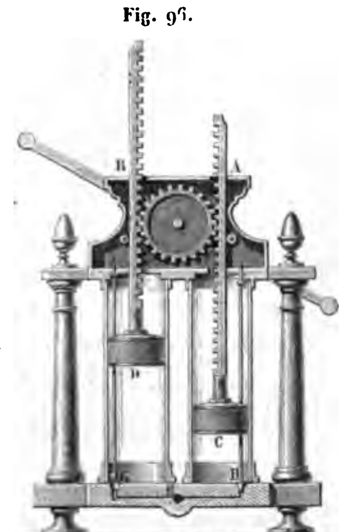
Le piston contient intérieurement un noyau en métal CC autour duquel sont empilées des rondelles de cuir découpées DD, imbibées d'huile et serrées par un couvercle métallique PP au moyen d'un écrou MM. A l'intérieur du tube CC est un clapet B ; c'est un bouton plat qui repose sur la base et bouche exactement un petit trou A dont elle est percée ; il est maintenu adhérent par un ressort à

boudin très-léger. Pour soulever ce clapet, il faudra que l'air inté exerce sur sa base un excès de pression au moins égal à son poids monté de l'élasticité du ressort : mais poids et ressort sont très-léger

La soupape qui fermait le conduit du récipient a été remplacée par tige de laiton qui peut glisser à frottement dans le piston. Elle est ter par un bouchon conique N qui vient fermer l'ouverture D quand le descend. Quand on le relève, il commence par soulever la tige et par la communication avec le récipient; mais aussitôt le sommet supérie la tige est arrêté par le couvercle du corps de pompe, et le piston re jusqu'en haut en glissant tout le long d'elle. Par cette disposition nique, l'air du récipient pénètre librement dans le corps de pompe que faible que soit devenue son élasticité.

Machine à deux corps. — Au moment où le vide commence à nir complet, il faut, pour soulever le piston, soutenir la pression sphérique qui appuie sur lui et qui dépasse 103 kilogrammes par mètre carré. Pour remé cette difficulté, on a d l'un auprès de l'autre corps de pompe pareils (*fig.* 96), tous deux en port avec le même réc par un conduit unique. deux pistons sont surm de deux tiges à crém A, B, engrenant avec un dentée qu'on fait mouv une manivelle à deux poi K, L; on fait ainsi altern ment monter l'un et desc l'autre des deux pistons.

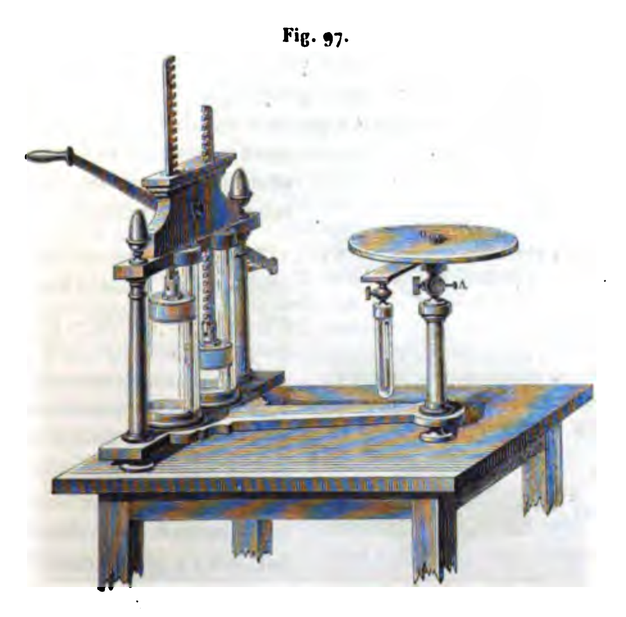
Fig. 96.



Par cet accouplemen deux machines, on de l'action et on détruit, à peu près, la résistance at sphérique, car si le vide est également fait sous les deux pistons, les p sions qui s'exercent sur chacun d'eux se composent en une résult unique appliquée sur l'axe de la roue dentée et qui est détruite p résistance de cet axe, de sorte que l'opération n'est pas plus pénib fin qu'au commencement.

Accessoires. — La machine est fixée sur une table solide (*fig.* 97); conduits des deux corps de pompe, réunis en un tronc unique, viennent ›utir au centre O d'un plateau où ils se terminent par un bouton sur uel on peut visser tous les appareils dans lesquels on a besoin de faire vide, et qui portent à cet effet un écrou qui s'accorde avec le bouton O.

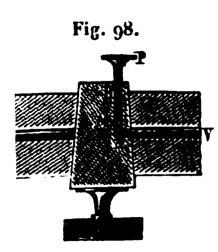
Fig. 97.



r le plateau, composé d'une glace plane adoucie à l'émeri fin, on peut ›liquer des cloches rodées et graissées dont l'adhérence est rendue par-:e par la pression atmosphérique qu'elles supportent.

Un robinet est placé en A (*fig.* 97) dans le trajet du tube qui va du récipient au corps de pompe. Ce tube est dessiné en CV (*fig.* 98). Le robinet est traversé par un canal M qui peut à volonté ouvrir ou fermer CV; il est en outre percé d'un conduit coudé HE par lequel il puise de l'air dans l'atmosphère pour l'introduire soit dans le récipient V, soit dans le corps de pompe C, suivant la position qu'on lui donnera : on peut fermer ce conduit par un bouchon métallique rodé P.

Fig. 98.

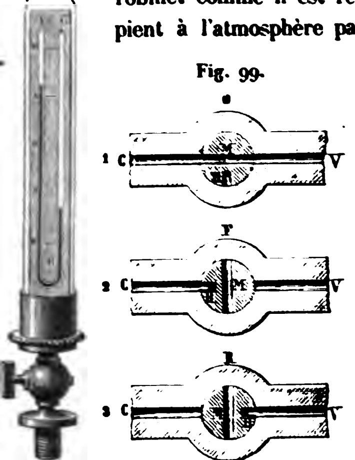


Pour bien comprendre le jeu de ce robinet, coupons-le par une section

perpendiculaire à son axe (*fig.* 99, n°s 1, 2, 3); si nous le tournons la première position, nous établirons par le canal M une communi- entre les corps de pompe C et le récipient V, nous pourrons faire le et une lettre O gravée sur la face supérieure de la clef indique à rateur que le robinet est *ouvert*. Dans la situation n° 2, le récipient communique plus avec la pompe, il ne reçoit pas l'air qu'elle laisse re- et la lettre F qui se lit sur la partie supérieure de la avertit que la machine est *fermée*. Enfin on peut pla- robinet comme il est représenté n° 3, ce qui réunit le r- pient à l'atmosphère par le conduit H, et la lettre R signifie *rentrée*, indique que peut être ramené dans la cloch enlevant le bouchon P.

Fig. 100.

Fig. 99.



Degré de vide. — Pour sa- quel est à un moment donné le gré de vide obtenu, la ma- porte un baromètre (*fig.* 100 veloppé d'une éprouvette de qui est en communication av récipient. Quand on fait le vid niveau baisse dans le tube ferm et monte dans le tube ouvert G qu'au moment où le vide étant fait, il n'y a plus aucune différ de niveau. A chaque instant la pression intérieure est représentée p différence de hauteur des deux colonnes. Généralement, ce baromètr tronqué et se réduit à une hauteur de 30 à 40 centimètres seulem dès lors le baromètre ne commence à baisser qu'au moment où la p- sion de l'air devient inférieure à une colonne de mercure égale à FH l'appareil ne sert à juger le degré du vide que lorsqu'il est presque comp

Calcul des épuisements. — Le degré de raréfaction qu'on pourra ob dépend beaucoup de la bonne confection de l'instrument. Théoriquemen est facile à calculer. Soient A la capacité du réservoir, B celle du corps pompe, et prenons pour unité la quantité d'air contenue dans le récipient q le piston est abaissé. Lorsqu'on le soulève, le volume occupé devient $A+B$. l'abaissant, on expulse un volume B, c'est-à-dire une fraction $\frac{B}{A+B}$ de la m- totale, et il reste dans le volume A la quantité $1-\frac{B}{A+B}=\frac{A}{A+B}$. Après seconde course double du piston, on aura enlevé la même fraction de l'air

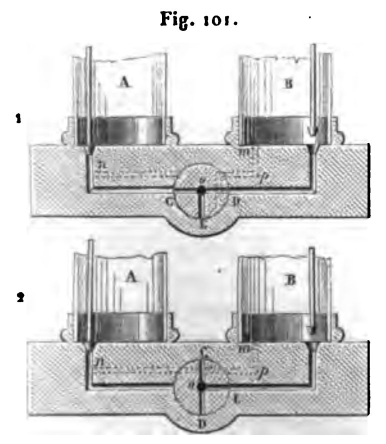
ue dans la première, c'est-à-dire $\frac{A}{A+B} \times \frac{B}{A+B} = \frac{AB}{(A+B)^2}$, et la quantité ui restera sera $\frac{A}{A+B} - \frac{AB}{(A+B)^2} = \frac{A^2}{(A+B)^2}$. En continuant le même raisonement, on trouvera, pour la quantité d'air qui reste après n opérations,

$$\frac{A^n}{(A+B)^n}.$$

Comme l'expression ci-dessus ne pourra devenir nulle qu'à la condition de ire $n = \infty$, on ne pourra enlever la totalité de l'air qu'après un temps infini. a machine pneumatique ne pourra donc jamais atteindre un vide parfait; mais, 'après la formule précédente, elle devrait en approcher de plus en plus si on continuait l'opération pendant plus longtemps. Cependant cela n'est pas rai dans la pratique : les meilleures machines font le vide jusqu'à un degré u'elles ne peuvent dépasser et qui s'arrête généralement à 2 ou 3 millimètres le mercure. Cela se comprend, car pendant qu'on enlève de l'air par le jeu de a machine, il en rentre par tous les joints. Au premier moment, l'épuisement st plus rapide que la rentrée; mais il se ralentit peu à peu, et il arrive une poque où les deux effets se compensent; alors la limite est atteinte, et un plus ong travail ne produit plus d'effet. La puissance de la machine est encore restreinte par une autre cause. Pour que le vide puisse avancer, il faut que l'air uisé dans le récipient à chaque course ascendante atteigne, après que le piston st ensuite abaissé, assez d'élasticité pour soulever le clapet, et comme il reste oujours encore un certain espace entre la base du piston et le fond du cylindre, l arrive un moment où le gaz qui se dilate quand le piston monte ne sort pas uand il descend. Cet espace se nomme *espace nuisible*.

Dispositif de M. Babinet. — Pour reculer la limite du vide, M. Babinet place dans l'axe même du tuyau qui réunit les deux corps de pompe un nouveau robinet CDE percé d'un trou transversal CD et d'un conduit longitudinal o. Quand il occupe la position n° 1 (*fig.* 101) il ne change rien aux communications habituelles; mais quand on le tourne de 90 degrés (n° 2), tout est modifié. Le corps B continue d'être en communication avec le récipient par le conduit oE. Quand on soulève le piston B, l'air arrive; quand on le baisse, il est chassé dans le corps A, qui est alors ouvert, par un petit tube latéral mnp qui traverse le robinet. En abaissant ensuite le piston

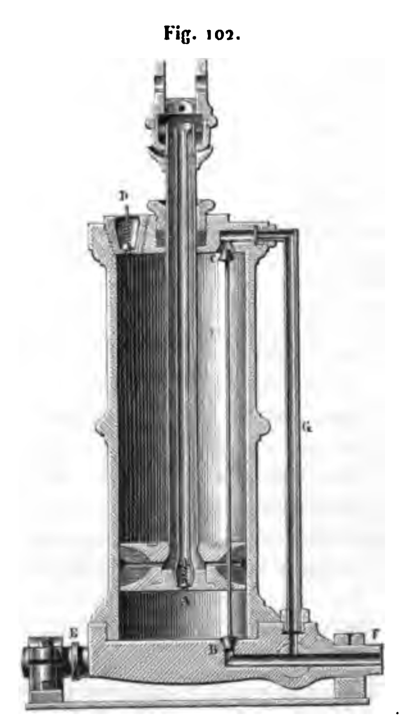
Fig. 101.



dans le cylindre A, l'air qu'on y a amené y reste emprisonné, puisq tige mobile ferme la base. Voici donc le jeu de la machine : le corps B plus pour fonction que d'enlever l'air au récipient et de le chasser da corps A ; là il s'accumule peu à peu, et bientôt il y acquiert assez de pour soulever la soupape. Au premier moment, elle s'ouvre toutes les qu'elle descend, puis ensuite elle ne s'ouvre que de deux coups en coups, ensuite de trois en trois, et enfin elle ne s'ouvre plus du tout. moment, les épuisements ne font que contre-balancer les rentrées males. La modification de M. Babinet améliore beaucoup la machine.

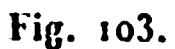
Machine de M. Bianchi. — La machine pneumatique de M. Bia n'a qu'un corps de pompe fermé aux deux bouts et que le piston par en deux parties fonctionnant parément. La communication le récipient F se fait par tubes CG et BF (*fig.* 102), et seule tige glissante vient alter tivement fermer les deux or par le moyen de bouchons niques. Deux soupapes d'ex sion sont disposées, l'une sur le couvercle supérieur, l' tre en A dans la tige du p qui est creuse. Si l'on sou le piston, il puise l'air par sa p tie inférieure B et il le chasse le compartiment supérieur; l'abaisse, les rôles changent : la capacité supérieure qui re l'air par C, c'est l'inférieure expulse celui qu'elle avait r par A. Bien qu'il n'y ait q corps de pompe, on obtient même effet que s'il y en a deux, puisque la même cour donne une double action, et pression atmosphérique se compense aussi bien que précédemment, plutôt elle ne s'exerce pas sur le piston.

Fig. 102.



Le cylindre repose sur un axe tournant EF (*fig.* 103), et la tige du pis ton est attachée à la manivelle H d'un volant. Quand on tourne celui-ci,

piston s'élève ou s'abaisse en même temps qu'il oscille, et le cylindre mobile s'incline et oscille avec lui. Le mouvement alternatif de l'ancienne


Fig. 103.



machine est donc remplacé par un mouvement de rotation, ce qui est toujours plus simple, et la vitesse est rendue constante par le moyen d'un volant très-lourd. Tout l'appareil est en fonte. Le tube d'aspiration qui part de l'extrémité F est formé d'une spirale recouverte de caoutchouc, et on peut la mettre en relation avec tous les appareils où l'on veut faire le vide.

Hémisphères de Magdebourg. — Crève-vessie. — On peut fair[e] avec la machine pneumatique, une s[érie] d'expériences propres à montrer l'énor[me] pression que l'atmosphère exerce. La [plus connue] de ces expériences est connue sous le n[om] des *hémisphères de Magdebourg*; elle [est] due à Otto de Guéricke, bourgmestre [de] Magdebourg, l'inventeur de la mach[ine] pneumatique. Deux hémisphères cr[eux] (*fig.* 104) à bords rodés, s'appliqu[ent] exactement l'un sur l'autre, et form[ent] par leur réunion une sphère entière. [Si] l'on y fait le vide par le robinet R et qu['on] le ferme ensuite, il faut un effort consi[dé]rable pour séparer les deux hémisphè[res]. Otto de Guéricke employa des globes cr[eux] d'assez faibles dimensions, et huit chev[aux] attelés, quatre de chaque côté, ne parv[en]aient pas à les dédoubler.

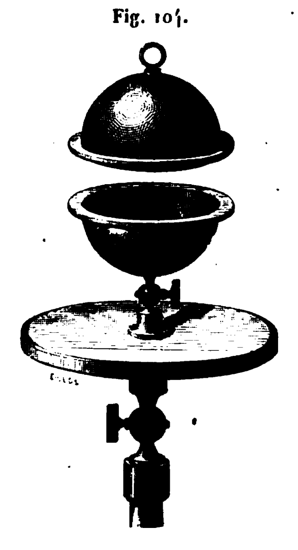


Fig. 104.

¹ Soit, en effet, r le rayon d'une sphère, en centimètres; sa plus grande sect[ion] offrira une surface egale à πr^2, et la composante de la pression atmosphéri[que] normale à cette section, sera représentée par $\pi r^2 . 1033$ grammes. Cette f[orce] s'exercera de chaque côté de la section. [En] prenant $r = 23$ centimètres, elle devient é[gale] à 1718 kilogrammes, et l'effort de traction [de] 4 chevaux n'est que de 1600 kilogrammes.

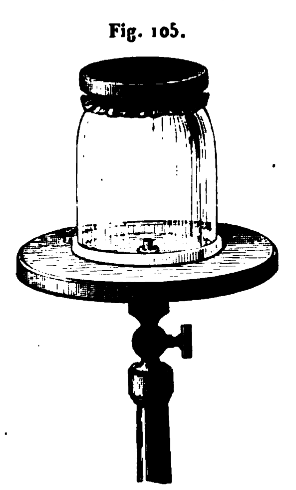


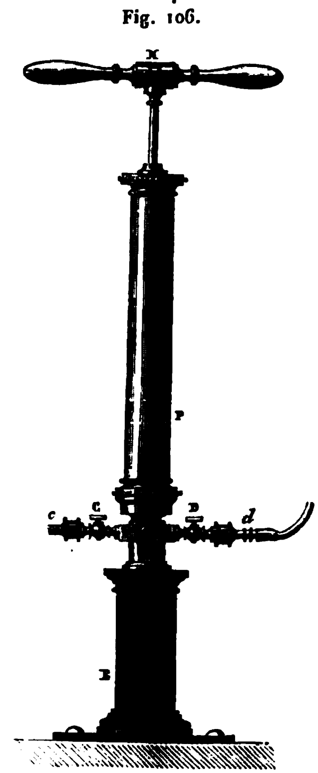
Fig. 105.

L'expérience du *crève-vessie* consis[te à] placer sur le plateau de la machine pneu[matique] un cylindre de verre (*fig.* [105]) fermé par un morceau de vessie qu['on] attache sur le bord. Lorsqu'on fait le v[ide] dans le cylindre, le vessie se creuse s[ous] le poids de l'air et finit par se briser.

Lorsqu'on place sous la cloche de [la] machine pneumatique une vessie pres[que] vide, comprimée et fermée, on la voi[t] gonfler par la pression de l'air qu'[elle] renferme encore, à mesure que le vide [se] fait dans la cloche; finalement, elle éc[late] et laisse échapper l'air qu'elle contenait.

Machine de compression. — Pompe à main. — On peut dire qu'il suffira e changer le sens de toutes les soupapes pour transformer la pompe pneuatique en pompe de compression. Supposons, par exemple, que les soupes A et B (*fig.* 94, p. 81) s'ouvrent de haut en bas. Quand on soulèvera piston, le vide se fera dans le cylindre, B se fermera par la pression du iz enfermé dans le récipient, A s'ouvrira par l'effort de l'atmosphère, et ute la capacité du corps de pompe se remplira d'air. Quand on viendra isuite à baisser le piston, ce gaz prendra une élasticité plus grande, fer era A, ouvrira B et s'introduira dans le récipient. On répétera l'opération itant de fois qu'on le voudra : à chaque course ascendante on prendra l'atmosphère une quantité constante d'air; à chaque marche descenante on la fera entrer dans le réservoir, et la masse accumulée croîtra suivant les termes d'une progression arithmétique. Cette action aura une limite que l'on atteindra forcément par les mêmes causes que dans la machine précédente : l'air puisé dans le cylindre finira par se loger dans l'espace laissé sous le piston en y acquérant justement une élasticité égale à celle du gaz déjà condensé; alors la soupape B ne s'ouvrira plus. On voit aussi que l'effort qu'il faudra exercer pour faire pénétrer le gaz ira en augmentant, car l'air confiné qui ferme la soupape résistera d'autant plus qu'il sera plus comprimé. Plus le piston aura d'étendue, plus la difficulté sera grande.

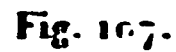
Fig. 106.

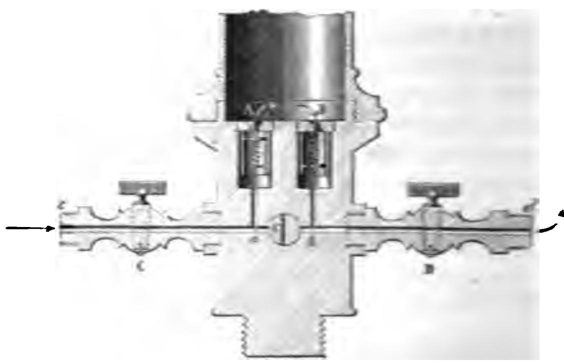


On peut donner à la machine de compression tout l'aspect extérieur et tout le mécanisme de la machine pneumatique à deux corps.

Mais cette machine est aussi mauvaise que la machine pneumatique est bonne; elle n'a pas de solidité, elle est une cause de danger sans être un instrument utile. On emploie de préférence une simple pompe à main (*fig.* 106), qui repose sur une masse métallique E, à base large. L'expérimentateur pose les deux pieds sur le rebord de la base, saisit le

manche à deux mains et le soulève ou l'abaisse alternativement I deux clapets A et B (*fig.* 107) : tous deux sont placés à la base du cy

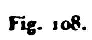

Fig. 107.

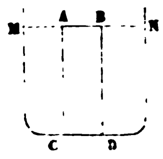


et affleurent avec sa surface : l'un A se meut de bas en haut et co nique avec un tube d'aspiration *ac*, il s'ouvre quand on élève le pi l'autre B est disposé en sens inverse ; il ouvre le conduit *bd* quand on cend le piston. En résumé, si deux réservoirs sont mis en rapport a et *d*, l'un recevra à chaque coup de piston le gaz qui sera pris dans l'a le premier se videra, le second s'emplira. Cet appareil est à la fois pompe de compression et une pompe aspirante. Dans le trajet des conduits *ac* et *bd* sont placés deux robinets C et D qui les ferment au soin, et un troisième robinet E placé entre eux sert soit à rendre l'air d le récipient *c*, soit à le laisser sortir du réservoir *d*.

VI. — ÉCOULEMENT DES LIQUIDES.

Théorème de Torricelli. — Si un tube ABCD (*fig.* 108) contient liquide jusqu'à une hauteur h, et que ce liquide tombe il aura une vitesse $\sqrt{2gh}$ quand la tranche AB sera arrivée en CD ; et si l'on admet que le niveau se rétablisse continuellement à mesure que l'écoulement liquide le fait baisser, chacune des tranches possède, en passant à l'orifice, la même vitesse $\sqrt{2gh}$. Cette vitesse ne changera pas si le tube considéré est remplacé par un vase MCDN de forme quelconque, puisque rien ne sera changé aux pressions ; donc la vitesse que prend un liquide en

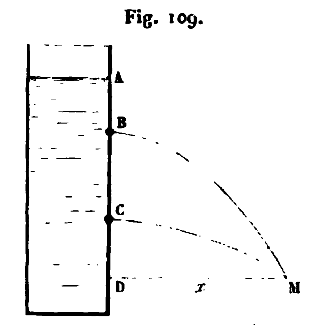

Fig. 108.



sortant d'un orifice percé dans la paroi du vase est égale à celle qu'aurait un corps tombant librement depuis le niveau supérieur jusqu'à cet orifice. D'où il suit que la vitesse d'écoulement est indépendante de la nature du liquide, et qu'elle est la même pour l'eau ou le mercure.

Pour vérifier ce théorème, dû à Torricelli, perçons dans la paroi verticale d'un vase AD (*fig.* 109), plein de liquide, une ouverture B. La veine BM s'échappera avec une vitesse horizontale $v = \sqrt{2gh}$, elle décrira une parabole dont l'équation sera (p. 11)

Fig. 109.



$$y = \frac{x^2}{4h}.$$

Si l'on perce un autre orifice C, à une profondeur AC $= h'$, on obtiendra une autre veine CM, qui rencontrera la première en M. Son équation, rapportée à l'origine C, sera

$$y' = \frac{x^2}{4h'};$$

et comme au point M les abscisses horizontales x sont les mêmes,

$$hy = h'y',$$

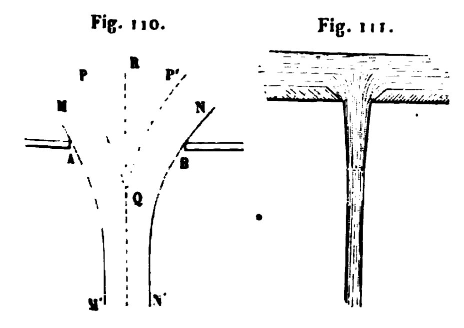
ou bien

$$AB.BD = AC.CD,$$

d'où AB = CD. Ces conséquences ont été vérifiées par l'expérience. Donc, la vitesse au départ est réellement égale à celle que donne la théorie.

Le théorème de Torricelli fait connaître la grandeur de la vitesse au départ, mais non sa direction. Voici ce que l'expérience apprend. La veine se compose sur son pourtour (*fig.* 110) de filets liquides MM'PQ, NN'P'Q, qui sont obliques et vont en convergeant l'un vers l'autre. Ils laissent entre eux un espace PP'Q dans lequel il n'y a point de mouvement, ou bien dans lequel il se produit des remous. On le constate avec de la sciure de bois mêlée à l'eau. Il suit de là que la veine se contracte depuis l'orifice AB jusqu'en M'N', où elle prend une section minimum, qu'elle garde ensuite sensiblement, et qui est égale aux $\frac{2}{3}$ environ de l'orifice (*fig.* 111). Par conséquent, la dépense de liquide est la même que

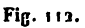
Fig. 110. Fig. 111.

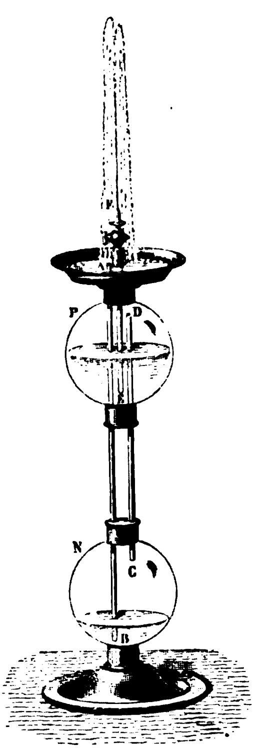


si cet orifice était réduit dans le rapport de 5 à 3 et que la veine fût cy-
drique. Cette dépense sera, en un temps t, égale à un cylindre de vol.
égal à $\frac{3}{5}a\sqrt{2gh}$, en désignant par a la section de l'orifice. L'expérie
confirme ce résultat.

Toutefois, si l'on adapte à l'orifice des ajutages de diverses formes
veine change; elle devient cylindrique si l'ajutage est cylindrique, et la d-
pense devient alors $a\sqrt{2gh}$ pour un orifice de section a.

Fontaine de Héron. — La fontaine qui porte le nom du philos
Héron d'Alexandrie (*fig.* 112) se comp-
d'un bassin A plein d'eau, prolongé par
tube AB jusqu'à une capacité N pleine d
Le liquide transmet en N la pression at-
sphérique augmentée d'une colonne d
égale à la différence de niveau AB. Le
qui remplit l'espace N transmet cette pr-
sion par le conduit CD jusque sur le liqu
que contient un troisième espace P. A
il y a la même pression en P qu'en N, et
un tube EF s'élève à partir de P, on verra
liquide y monter d'une hauteur égale à A
ou bien, si ce tube est coupé en F, l'e
jaillira.


Fig. 112.

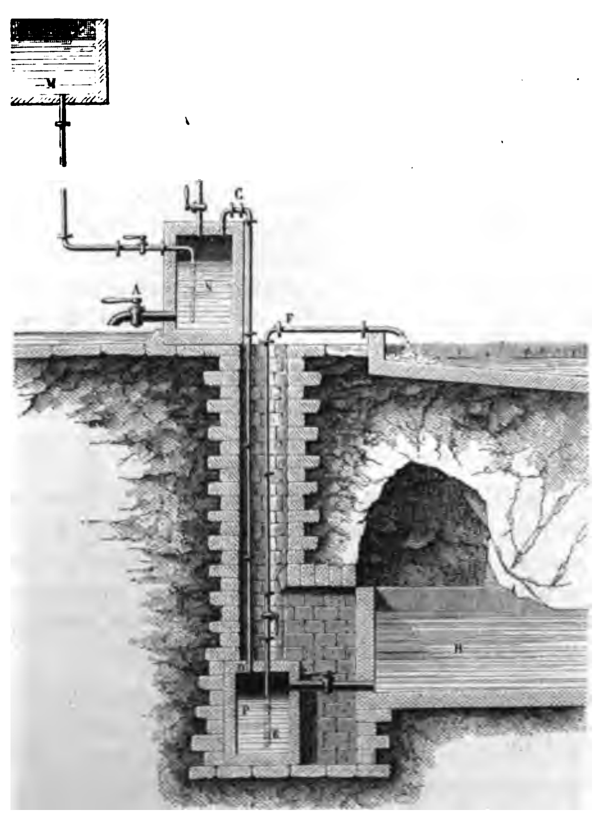


Supposons, par exemple, que le vase
soit situé au niveau du sol (*fig.* 113), qu
reçoive de l'eau provenant d'une sour
très-élevée M et que le réservoir P s
placé au fond d'une mine. La pression q
sera transmise par le tube CD sur le nive
de l'eau dans P sera égale au poids de l'a
mosphère augmenté de MN, et elle fera
monter l'eau par le tube EF jusqu'à une
hauteur égale à MN au-dessus de P. Cette
eau pourra se déverser sur le sol, pourvu
que la profondeur de la mine soit au plu
égale à MN. En laissant continuer l'écoule-
ment, le réservoir N s'emplira d'eau et P s'emplira d'air. Quand cela
aura lieu, on ouvrira le vase N pour le vider, et P pour le remplir d'eau
prise en B au fond de la mine. Les choses se retrouveront dans leur état
primitif, et l'on recommencera l'épuisement.

C'est la machine qui est employée à l'épuisement d'une mine de sulfure de plomb, à Schemnitz en Hongrie.

Fig. 113.





Fontaine intermittente. — Un réservoir que l'on peut remplir d'eau et fermer ensuite par un bouchon K (*fig.* 114) se termine à sa partie inférieure par plusieurs petites ouvertures A, B. Un tube P*p*, qui débouche en *p* à la partie supérieure du vase, sert à le supporter dans une cuvette MN, et son extrémité inférieure P s'ouvre à une très-petite distance du fond de la cuvette. Il est clair que la pression de l'atmosphère se transmet par l'intérieur de cette colonne et vient s'exercer sur CD. De CD en A, B, cette pression s'augmente du poids de la colonne CA. Par suite, l'eau tend à sortir par les tubes A et B avec une force égale à l'atmosphère augmentée

de CA. Comme elle est poussée de dehors en dedans par l'atmosphère seulement, elle sortira avec un excès de pression mesuré par CA. Mais l'eau tombant dans le bassin MN s'y accumule et bientôt s'élève jusqu'à l'ouverture P qu'elle bouche. A ce moment la pression atmosphérique cesse de s'exercer dans la colonne et sur CD, et comme l'eau continue de s'écouler, l'espace occupé par l'air augmente, sa pression diminue, et l'on voit le niveau s'élever peu à peu dans le tube jusqu'en E. Alors la pression en ce point est H — PE (H étant la pression atmosphérique); elle est même sur CD, et en A elle est représentée par H — PE + CA. Quand PE est devenu égal à CA, le liquide reçoit en la pression de l'atmosphère, du dehors en dedans et du dedans au dehors. Alors l'écoulement cesse.

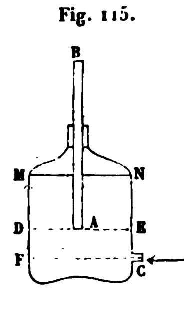
Fig. 114.



Il y a au bassin un tube d'écoulement, mais qui débite moins d'eau que les ouvertures A et B. Peu à peu cependant l'eau s'écoule, fait baisser le niveau dans MN jusqu'au-dessous de l'ouverture P; alors l'air atmosphérique y pénètre, s'insinue dans le tube, y rétablit la pression initiale, et l'appareil, revenu à l'état primitif, reproduit les mêmes actions, c'est-à-dire un nouvel écoulement suivi d'une seconde occlusion.

Vase de Mariotte. — Un flacon contenant de l'eau et surmonté d'un bouchon dans lequel passe un tube AB (*fig.* 115) est percé en C d'un orifice latéral étroit. Si au commencement de l'expérience le liquide est au niveau commun MN dans le vase et dans le tube, la pression est égale à celle de l'atmosphère sur ce niveau et sur la couche FC elle est augmentée de la hauteur NC. Le liquide s'écoulera donc par l'orifice C avec un excès de pression mesuré par NC. Mais aussitôt qu'il commencera à sortir, l'espace occupé par l'air dans le flacon augmentera, la pression diminuera, on verra le niveau baisser dans le tube AB et arriver à l'extrémité A.

Fig. 115.

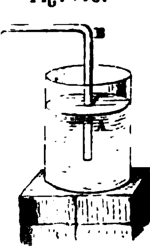


Jusque-là, l'écoulement s'est fait en se ralentissant peu à peu; mais

sitôt qu'on atteint cette limite, l'action change. En effet, quand une ıvelle quantité de liquide s'écoule, la pression tend à diminuer dans le on, et le niveau dans le tube à baisser : des bulles d'air descendent, :happent et vont rejoindre l'air qui est au-dessus de MN. A partir de moment la pression est égale à celle de l'atmosphère sur la couche DE. · FC elle est augmentée de CE qui est invariable; l'écoulement est con-nt et se fait comme si le niveau dans le flacon demeurait constamment DE; il est plus ou moins rapide suivant que la hauteur CE est plus ou ins grande.

;iphon. — Le siphon est un tube à double courbure ABCD (*fig.* 116), préalablement rempli du liquide dans lequel il plonge en A.

Fig. 116.



Les deux branches AB et CD ont des longueurs inégales h et h'. La pression atmosphérique H s'exerce en A et tend à faire monter le liquide dans AB; au point B elle est $H - h$ et dirigée de A en B. D'un autre côté, la pression H s'exerce, en D, de D vers C; elle est $H - h'$ au point C. Ainsi sur le même niveau BC, deux pressions inégales chassent le liquide en sens inverse, et leur différence est $H - h - (H - h')$ $h' - h$ agissant de B vers C.

)uand $h' > h$, l'eau coulera et tombera par l'orifice D avec une vitesse ıstante si les niveaux ne changent pas. Quand $h = h'$, l'équilibre aura ı, et enfin si l'on suppose $h' < h$, le liquide contenu dans le siphon ren-ra dans le vase. Si BC se trouvait à une hauteur plus grande que H au-sus de l'un ou de l'autre des niveaux, il se ferait un vide barométrique haut du siphon et il ne fonctionnerait plus. Le même effet aurait lieu ns le vide.

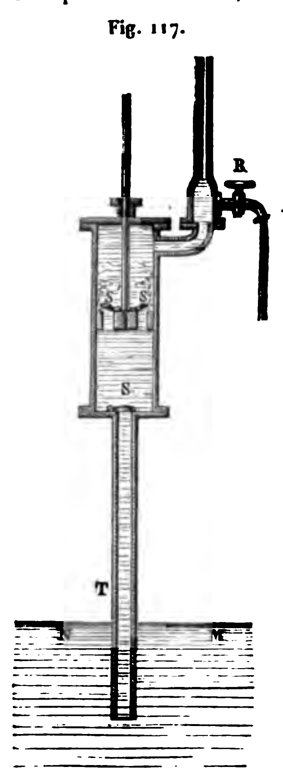
On peut, au moyen du siphon, obtenir un écoulement constant en le sant flotter sur le liquide, car alors il baisse avec ce liquide et reste dans même position par rapport à lui.

Pompes. — C'est sur les mêmes principes que reposent les appareils :s-divers que l'on comprend sous le nom général de *pompes*, et qui ser-nt à élever l'eau par aspiration, par pression, ou par les deux effets com-ıés.

La théorie des *pompes aspirantes* est en tout semblable à celle de la ma-ine pneumatique que représente la *fig.* 94, p. 81. Un piston (*fig.* 117), ını de soupapes S', S' qui ouvrent de bas en haut, se meut dans un corps pompe prolongé par un tuyau d'aspiration T qui s'enfonce dans l'eau.

Ce tuyau est fermé à son extrémité supérieure par une soupape S, ap- *soupape dormante*. Au-dessus du piston s'embranche sur le corps de p un tuyau de déversement. Supposons d'abord que le piston s'app sur S et que le tuyau d'aspiration est rempli d'air à la pression ordin Si le piston est soulevé, il laisse au-dessous de lui un vide dans lequ nètre aussitôt, par la soupape S, l'air renferme le tuyau T; lorsqu'il descen soupape S se ferme, les soupapes S', S' vrent et l'air est chassé dans la partie rieure du corps de pompe d'où il s'éch par l'orifice R quand le piston remon mesure que le vide se fait ainsi dan tuyau T, la pression atmosphérique y él l'eau, qui finit par atteindre la soupape par être aspirée à son tour dans le corp pompe. La pompe est alors amorcée: p dant sa descente, le piston comprime qui est au-dessous de lui et la chasse p soupapes S', S'; pendant qu'il remonte soulève jusqu'à l'orifice R par où elle coule, et la soupape S livre alors passag liquide renfermé dans le tuyau d'aspira

Fig. 117.



Dans les *pompes ménagères*, il y a encor dessus du tuyau de déversement R un t vertical muni d'une soupape dans lequel l' est chassée pendant l'ascension du piston l'orifice R reste fermé par un robinet, a que cela se voit dans la *fig.* 117.

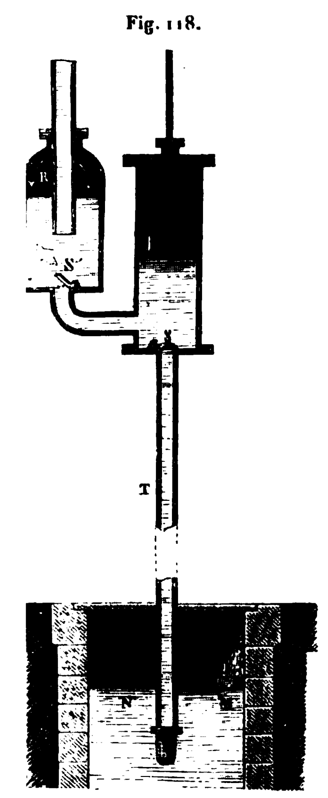
La hauteur du tuyau d'aspiration T peut pas dépasser 10 mètres, parce qu' colonne d'eau de 10 mètres fait déjà équ libre à la pression atmosphérique. Dans la pratique on ne peut même p atteindre cette limite de 10 mètres, parce qu'il reste toujours entre le pis ton et la soupape S un *espace nuisible* rempli d'air dont la pression s'ajout à celle de la colonne d'eau soulevée.

Le poids qu'on soulève en agissant sur le piston est celui d'une colonne d'eau dont la base serait la surface du piston, et la hauteur la distance de l'orifice d'écoulement au niveau MN. En effet, la pression sur la surface supé rieure du piston est égale à celle de l'atmosphère H, augmentée de la hauteur du liquide superposé; la pression exercée par le liquide inférieur est H –

ignant par h' la hauteur du piston au-dessus de MN; la différence est égale $+ h'$, c'est-à-dire à la hauteur de R au-dessus de MN. La colonne d'eau aprise entre le piston et le niveau MN agit donc comme un poids suspendu ı base inférieure du piston, et l'effort qu'il faut faire pour soulever ce der-r est constant, quelle que soit la position du piston entre le haut et le bas sa course.

)ans les *pompes foulantes* le piston est plein et sans soupapes; le ps de pompe est directement plongé dans l'eau, et le liquide qui pénètre par la soupape dormante S est chassé dans un tube latéral. Une pompe foulante munie d'un tuyau d'aspiration (*fig.* 118) s'appelle *pompe aspirante et foulante*.

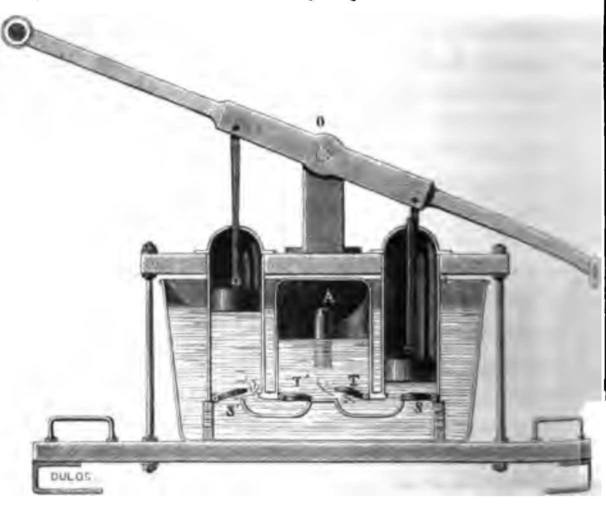
Fig. 118.



Voici le jeu de ces machnies. Pendant qu'on remonte le piston, l'eau pénètre par la soupape dormante S et vient remplir le corps de pompe; pendant que le piston descend, la soupape S reste fermée, et le liquide précédemment aspiré est chassé par la soupape S′ dans un tube vertical où il s'élève. Si ce tube était simplement superposé à l'orifice S′, l'écoulement n'aurait lieu que pendant la descente du piston; il s'arrêterait pendant la phase inverse. Pour le rendre continu, on a imaginé de disposer au-dessus de S′ un réservoir d'air R dans lequel plonge le tube d'ascension, et de terminer ce tube par un orifice étroit. L'eau qui, pendant la descente du piston, pénètre dans ce réservoir R, ne s'écoule pas tout entière par le tube vertical; une partie reste et comprime l'air emprisonné dans la cloche R. Lorsque le piston remonte, la soupape S′ se ferme, l'air comprimé se dilate, et sa ction continue de chasser l'eau dans le tube d'ascension jusqu'au moment le piston redescend et que la soupape S′ se rouvre pour livrer passage ne nouvelle provision de liquide. Grâce à cet artifice, le jet d'eau dent continu.

Les *pompes à incendie* (*fig.* 119) sont des pompes foulantes à
corps, avec un réservoir d'air A au milieu; les deux pistons sont m


Fig. 119.



mouvement par un double levier, et les soupapes T, S' s'ouvrent
T' et S se ferment. Ces pompes fonctionnent d'une manière continue
au jeu alternatif des pistons et à la réaction de l'air comprimé dans
servoir A.

LIVRE II.

DE LA CHALEUR.

CHAPITRE PREMIER.

DE LA NATURE DE LA CHALEUR ET DE SA MESURE.

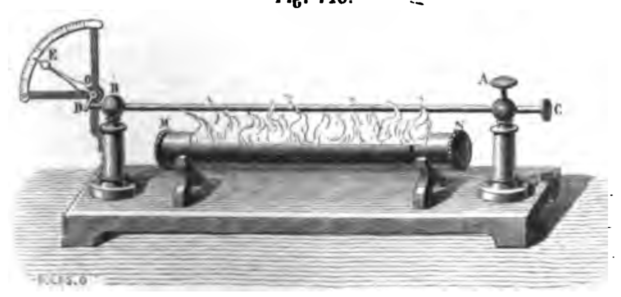
I. — LE THERMOMÈTRE.

Notions préliminaires. — Les corps, sans changer de nature, peuvent devenir chauds ou froids. Ils se modifient par conséquent sous l'influence d'une cause spéciale que nous appelons *chaleur;* elle s'accumule dans ces corps quand ils s'échauffent, elle les abandonne quand on les refroidit. Quelle que soit sa cause, la chaleur est une grandeur; on la mesurera par un appareil nommé *calorimètre*.

On désigne par le mot *température* l'état calorifique essentiellement variable avec le temps, mais déterminé à un moment donné, dans lequel se trouvent les corps. On va l'apprécier par le *thermomètre*, après avoir trouvé, comme il suit, que toute matière augmente ou diminue de volume quand on la chauffe ou qu'on la refroidit.

Dilatabilité. — Sur une base solide en bois sont fixées deux colonnes

Fig. 120.

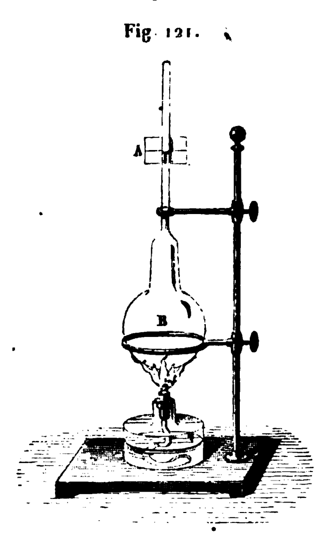


métalliques verticales A et B (*fig.* 120); leurs parties supérieures sont

percées de deux trous cylindriques horizontaux dans lesquels on introduit une tige métallique CD. Une vis de pression A fixe l'une des extrémités de la tige, pendant que l'autre bout D reste libre d'avancer ou de reculer.

On amplifie le mouvement au moyen d'un levier coudé DOE, dont la partie verticale très-courte OD est chassée par l'extrémité D et dont la branche horizontale très-longue OE parcourt un limbe divisé. Sous la tige se trouve, dans une auge de cuivre MN, une mèche imbibée d'alcool qu'on allume et qui échauffe la tige. Tant que la température croît, le levier indicateur s'élève; quand elle devient constante, il demeure fixe, et si elle diminue, il s'abaisse. Tous les métaux que l'on place dans cet appareil éprouvent la même action; à des différences de grandeur près, tous se dilatent.

Fig. 121.



Pour constater la dilatation des liquides, il suffit de les enfermer dans un ballon B terminé par un tube étroit (*fig.* 121), de marquer avec un index le sommet initial A du liquide et de plonger le ballon dans l'eau chaude: on voit bientôt le niveau dépasser l'index.

Les liquides sont plus dilatables que les solides, et les gaz plus que les liquides. Pour le montrer, on peut garder l'appareil précédent, le remplir d'air et introduire dans le tube capillaire qui le termine un index liquide A. Toutes les fois que l'on touchera le ballon avec la main, on verra l'index monter vivement; il s'abaissera aussitôt que l'on remettra l'appareil dans ses conditions primitives.

Thermomètre. — Cette loi générale de la dilatation une fois démontrée, on peut construire des appareils analogues aux précédents et les disposer de manière à mesurer à chaque instant le volume d'un corps convenablement choisi. Suivant que ce volume augmentera, restera constant ou diminuera, on saura que la température du corps s'élève, reste stationnaire ou s'abaisse; et l'état calorifique étant ainsi lié à l'état du volume, on conçoit que l'on puisse mesurer les changements de température par l'effet mécanique qu'ils produisent, c'est-à-dire par la dilatation; il n'y aura pour cela qu'à choisir des unités conventionnelles. Les instruments construits sur ce principe sont des *thermomètres*.

Celui de ces appareils que l'on emploie le plus habituellement est connu de tout le monde. C'est un vase de verre composé d'un réservoir que surmonte un tube étroit, bien calibré et fermé à son extrémité (*fig.* 122).

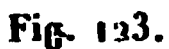
Fig. 122.

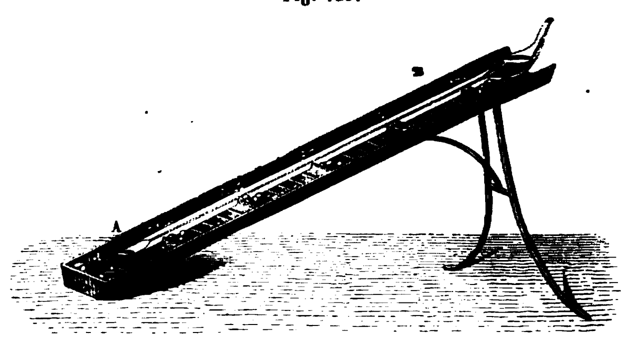
Le réservoir et une partie du tube contiennent du mercure, et le niveau de ce liquide s'élève ou s'abaisse dans la tige suivant que la température de l'instrument augmente ou diminue. Pour graduer d'une manière identique les thermomètres construits par divers expérimentateurs, on est convenu de marquer zéro à l'endroit de la tige où le mercure se fixe lorsque l'appareil est plongé dans la glace fondante, et 100 au point où se maintient le sommet de la colonne, quand le thermomètre se trouve dans l'eau bouillante sous la pression de 760 millimètres. Ces deux températures étant invariables, il est permis de les prendre pour points de repère; on divise ensuite en 100 parties égales la capacité intérieure de la tige comprise entre ces points, et l'on prolonge les divisions au-dessous de zéro et au-dessus de 100. Une division s'appelle un *degré;* quand on dit ensuite, par exemple, que la température est de 15 degrés, cela exprime que le thermomètre est arrivé à un état calorifique défini par cette condition, que le volume de mercure s'est accru, depuis zéro, des 15 centièmes de sa dilatation totale entre zéro et 100 degrés.

Construction du thermomètre à mercure. — On choisit d'abord le tube thermométrique, dont le canal intérieur doit être fin et parfaitement cylindrique. Pour savoir si cette condition est remplie, on introduit dans ce canal une colonne continue de mercure de 50 millimètres environ, on la promène de l'un à l'autre bout du tube et on mesure sa longueur exacte dans les diverses positions qu'elle occupe. Quand en avançant elle s'allonge ou se raccourcit sensiblement, le tube doit être abandonné; mais, lorsque sa longueur demeure constante à 1 millimètre près, de l'une à l'autre extrémité, il peut être considéré comme bon.

Le tube étant choisi, on le lave d'abord à l'acide azotique bouillant pour brûler les matières organiques qu'il contient, puis à l'eau pour le rincer, et on le dessèche par un courant d'air chaud. Ensuite, il faut adapter à cette tige le réservoir à mercure. On souffle ce réservoir à une des extrémités avec la lampe d'émailleur; la forme cylindrique est la plus commode. Pour introduire le mercure, on commence par souffler ou souder à l'autre bout du tube un large entonnoir, et après y avoir versé du mercure, on dépose le tube sur un gril incliné AB (*fig.* 123). En chauffant avec des charbons, l'air intérieur s'échappe, et, en refroidissant, le mercure prend la place

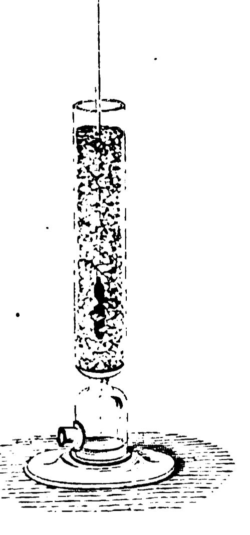
de l'air. Il faut avoir soin d'échauffer le verre dans toute sa longu-
aussi bien que le mercure dans toutes ses parties et de faire bouillir


Fig. 123.



liquide plusieurs fois dans le réservoir pour ne laisser aucune trace d'h
midité dans l'appareil.

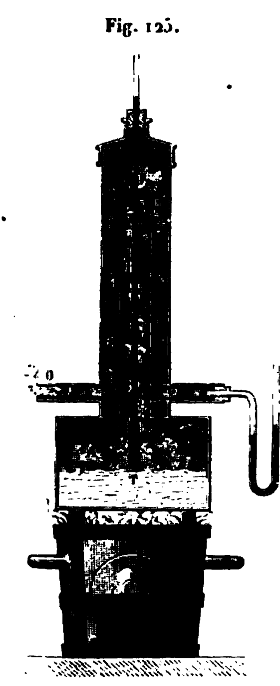
Avant de fermer le thermomètre, on le porte à la température maxi-
qu'il doit indiquer, afin de chasser de
tige l'excédant de mercure ; on le refroi-
ensuite, afin de voir quel sera le minim
de température que l'instrument pour
donner. Ces essais ont pour but de déter-
ner à l'avance la quantité de mercure q
faut laisser. Quand ils sont terminés,
réchauffe le tube jusqu'à faire arriver
mercure au sommet de la tige et chass
tout l'air qu'elle contenait, puis on la ferm
dans le dard du chalumeau.


Fig. 124.

Il reste enfin à chercher les points fixe
et 100. Pour le premier, l'opération est trè
simple : on enfonce l'appareil tout ent
dans une éprouvette à pied remplie de g
(*fig.* 124) ; on attend que la colonne mer-
rielle soit devenue stationnaire, et l'on s
lève le tube juste de ce qu'il faut pour ap
cevoir le sommet du mercure au-dessus d
la glace : c'est là qu'est le point zéro. On l
marque sur la tige. Pour le point 100
fait plonger le thermomètre dans l'eau bouillante sous la pression

760 millimètres. Mais comme la température augmente depuis la surface jusqu'au fond d'une colonne d'eau bouillante, il vaut mieux plonger le thermomètre, non dans l'eau, mais dans la vapeur qu'elle fournit. On emploie à cet effet l'étuve représentée *fig.* 125. Le thermomètre est en T. La vapeur en s'élevant l'enveloppe de toute part; elle redescend ensuite dans le manchon CC qui prévient le refroidissement du tube BB; elle s'échappe enfin par l'ouverture O. Sa température est égale à 100 degrés lorsque la pression est 760 millimètres; mais en général le baromètre est à une hauteur quelconque H au moment de l'observation, et comme la température de l'ébullition s'élève avec la pression, c'est une autre température qu'il faudra marquer; on la trouvera dans des Tables que nous ferons connaître dans la suite.

Fig. 125.



Quand la température maxima que peut indiquer un thermomètre ne doit pas atteindre 100 degrés, on la marque par comparaison avec un thermomètre étalon, et on divise l'intervalle depuis zéro en autant de parties qu'elle contient de degrés.

Les divisions ainsi obtenues ne représentent cependant pas des capacités égales, à cause des défauts inhérents au calibrage de la tige. Il y a plusieurs procédés pour corriger cette imperfection, voici le plus pratique : quand les points fixes sont marqués, on frappe avec le doigt un coup sec sur la tige du thermomètre retourné, et on détache ainsi une portion de la colonne mercurielle qu'on peut librement faire glisser d'une extrémité à l'autre. Supposons qu'elle soit à peu près la moitié de l'intervalle de 0 à 100. On mettra successivement les deux extrémités, antérieure et postérieure, en contact avec 100 et 0, on notera les positions des deux autres bouts, qui seront très-voisines, on prendra le milieu de l'intervalle : ce sera le point 50. On opérera de même entre 0 et 50, entre 50 et 100, et, quand les repères ainsi déterminés seront assez nombreux, on divisera en parties égales les distances qui les séparent.

En Allemagne, on emploie encore l'échelle de Deluc, qu'on attribue à tort à Réaumur; elle ne diffère de notre échelle centigrade qu'en ce que l'eau bouil-

lante y marque 80 au lieu de 100. On passe de l'échelle Réaumur à l'éch centigrade en multipliant les degrés Réaumur par $\frac{5}{4}$.

En Angleterre, on se sert de la division de Fahrenheit, où la glace est m quée + 32 degrés, l'eau bouillante + 212 degrés. Pour convertir les d Fahrenheit en degrés centigrades, on retranche 32, et l'on multiplie le r par $\frac{5}{9}$.

L'un des principaux inconvénients des thermomètres à tige est ce q appelle le *déplacement du zéro*. Quand on a déterminé les points fixes médiatement après la construction du thermomètre, on trouve souv quelque temps après, que ces points se sont relevés de 1 degré et p comme si le vase avait diminué de capacité. Despretz a même vu ces dé cements se continuer progressivement pendant cinq années. Ils sont p duits par la trempe du verre, et ils diminuent d'amplitude quand ce v est soufflé depuis longtemps et qu'il a été bien recuit. Mais il est import de vérifier de temps à autre les points fixes des thermomètres.

Autres thermomètres. — Toutes les matières se dilatant peuvent ê employées pour construire des thermomètres. Ainsi l'on remplace sou le mercure par l'alcool coloré qui ne se congèle jamais et peut indiquer les températures les plus basses. On peut aussi construire des therm mètres à air comme nous le verrons bientôt; enfin il existe des therm mètres métalliques : nous n'étudierons que celui de Breguet.

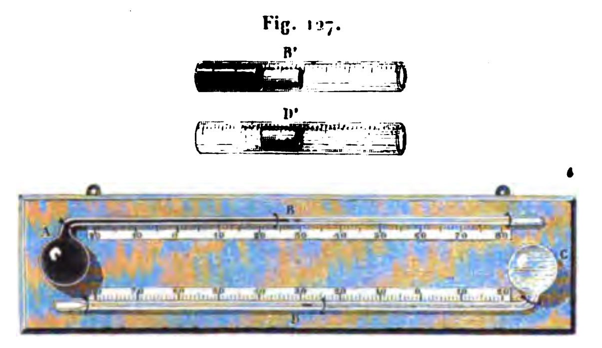
On construit ces instruments en composant une lame avec tr métaux soudés : le platine, l'or l'argent, superposés par ordre cr sant de dilatabilité. On amincit cet feuille au laminoir et l'on en déta un ruban très-étroit et très-min que l'on enroule en spirale. On s pend ensuite cette spirale à un sup port (*fig.* 126), et l'on attache à s extrémité une aiguille qui parcou les divisions d'un cadran. Si l'argent est à l'intérieur, toute augmentation de température fait détordre la sp rale, toute diminution la fait tordr davantage, et l'aiguille marche da un sens ou dans un autre, suivant que l'appareil s'échauffe ou se refroidit. Comme la spirale a très-peu d masse, elle partage et accuse à l'instant tous les changements de temp rature.

Fig. 126.



Thermomètres à maximum et à minimum. — Rutherford emploie

Fig. 127.



mme appareil à maximum un thermomètre à mercure ordinaire AB *fig.* 127), gradué comme tous les autres, mais horizontal et contenant dans sa tige au delà de la colonne mercurielle un petit cylindre de fer B que l'on voit agrandi en B'. Quand la température s'élève, l'index est chassé par le mercure; quand elle baisse, le mercure se contracte et reflue vers le réservoir, mais il laisse l'index au point où il l'a poussé au moment du maximum.

Fig. 128.

Pour thermomètre à minimum, le même physicien construit un appareil à l'alcool CD, ne différant des autres que par un index d'émail D et D'; c'est un petit tube creux, ordinairement coloré, qui plonge dans l'alcool. Si la température croît, l'alcool dépasse l'index sans le déplacer; mais si elle diminue, le sommet de la colonne d'alcool rétrograde, atteint l'index et l'entraîne avec lui par adhérence jusqu'au point où il se fixe au moment du minimum.

Le thermométrographe de Six et Bellani indique à la fois le maximum et le minimum (*fig* 128). Il se compose d'un réservoir D plein d'alcool, d'un siphon DCB contenant une colonne de mercure CB, et d'un tube droit BA où se trouvent encore de l'alcool et une chambre vide A. Quand la température croît, le niveau C baisse et le niveau B monte; le contraire a lieu si elle décroît. Au-dessus de B et de C sont deux index formés par une ampoule de verre dessinée à part en F; elle contient un cylindre fer et se soutient dans l'alcool par la pression d'un petit ressort de

verre P. Quand l'un des sommets C ou B s'élève, l'ampoule qui lui superposée est chassée par le mercure et s'élève avec lui : quand il baisse, l'ampoule reste dans l'alcool à l'endroit où a été soulevée. On voit que l'index B marquera les maxima que C donnera les minima. Après chaque observation, on ramène au contact du mercure au moyen d'un aimant qui les cylindres de fer enfermés dans chaque ampoule.

Fig. 129.

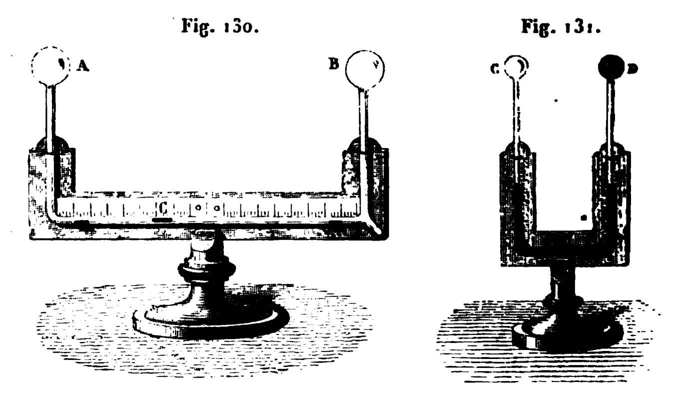
C

A

M. Walferdin a construit un autre thermomètre à maxima: il termine la tige par une pointe fine B (*fig.* 129) et il l'enveloppe dans une cavité à panse C où se trouve assez de merc pour la recouvrir quand on retourne l'appareil. On conçoit dans cette position renversée on peut remplir la tige en lité, et qu'en redressant le thermomètre, le mercure sortira la pointe et tombera dans la panse quand la température tera. Au moment du maximum, la tige sera pleine ; si un refroidissement survient, le mercure baissera, mais on pourra retrouver le maximum en réchauffant le thermomètre dans l'eau jusqu'à ramener le sommet en B, et en mesurant la température de cette eau.

Thermomètre différentiel. — Pour apprécier une différence de température, Leslie a imaginé l'instrument représenté dans la *fig.* 130. C'est un siphon CABD terminé par deux boules et D égales entre elles, fermées et pleines d'air. Une colonne d'acide sulfurique coloré occupe la partie inférieure AB et présente le même niveau dans les deux branches quand les températures de

Fig. 130. Fig. 131.



de D sont les mêmes. Aussitôt qu'on échauffe D, l'air se dilate et

baisser le niveau B. On gradue cet appareil en plaçant les deux boules dans de l'eau, en établissant entre elles une différence de température de 10 degrés, et en marquant 10 aux points où se placent les deux niveaux et 0 aux points A et B; ensuite on divise l'intervalle en 10 parties d'égale capacité.

Rumford a donné à cet appareil de plus grandes dimensions (*fig.* 131), et il a réduit la colonne liquide à un simple index C très-petit; cet instrument se gradue comme le précédent. Il peut accuser des différences très-faibles de température.

II. — LE CALORIMÈTRE.

Notions préliminaires. — Quand on fait brûler dans l'oxygène 1, 2, 3,..., grammes de charbon, ou quand on échauffe de zéro à t degrés 1, 2, 3,..., kilogrammes d'un corps quelconque, il est évident que l'on dégage ou qu'on absorbe des quantités de chaleur proportionnelles aux nombres 1, 2, 3,.... On conçoit par ces exemples que les quantités de chaleur qui se développent par les actions chimiques ou qui s'accumulent dans la matière quand on l'échauffe puissent être considérées comme des grandeurs et comparées à une unité que l'on conviendra d'adopter.

La *calorimétrie* est la partie de la Physique qui s'occupe de cette comparaison.

L'unité que l'on a choisie est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de zéro à 1 degré 1 kilogramme d'eau. On la nomme *calorie*.

Si l'on échauffe P kilogrammes d'eau de 0 à 1 degré, ils absorberont P calories. Si on les porte de zéro à t degrés, ils prendront une quantité de chaleur Q égale à Pt.

On le démontre par l'expérience suivante :

On mélange dans un vase bien mince 2 kilogrammes d'eau, l'un à zéro, l'autre à 100 degrés, et l'on constate que le mélange prend la température de 50 degrés. L'eau à 100 degrés a cédé de la chaleur qui a échauffé l'eau à zéro; la première a baissé de 50 degrés, la seconde a monté de 50 degrés : donc la même quantité de chaleur élève le même poids d'eau d'un même nombre de degrés, quelle que soit la température initiale; d'où il résulte que la quantité de chaleur Q nécessaire pour élever P kilogrammes d'eau de t à t' degrés, sera

$$Q = P(t - t').$$

Si maintenant on verse 1 kilogramme de mercure à 100 degrés dans 1 kilogramme d'eau à zéro, le mélange est à 3°,2; c'est encore la même

quantité de chaleur que le mercure perd et que l'eau gagne; or e... varier la température du mercure de 96°,8 et celle de l'eau de 3°,2, prouve qu'il faut des quantités de chaleur inégales pour échauffer ... même nombre de degrés des poids égaux de substances différentes.

On appelle *chaleur spécifique* ou *capacité calorifique* d'un corps ... nombre de calories nécessaire pour élever de zéro à 1 degré 1 kilogramme de ce corps.

Soit C cette chaleur spécifique, $PC(t'-t)$ exprime la quantité de ... leur Q_1 qu'il faut donner à P kilogrammes du corps pour élever sa ... pérature de t à t' degrés :

$$Q_1 = PC(t'-t).$$

Il est nécessaire de mesurer les chaleurs spécifiques des corps; on ... au moyen d'instruments nommés *calorimètres* et que nous allons dé...

Calorimètre à glace. — Black préparait un calorimètre avec un ... de glace pure. Il y creusait une cavité dont il essuyait avec soin l'inté... et qu'il recouvrait avec une lame de glace bien sèche. L'appareil po... être abandonné dans l'air sans qu'il se fondît aucune portion de glace ... la cavité, car la chaleur extérieure était arrêtée par les parois. On y ... jetait une substance échauffée à T degrés et on refermait le couvercle ... bout de peu de temps, cette subs... avait fondu de la glace et s'éta... froidie jusqu'à zéro; on ouvrait le ... rimètre, on recueillait et on pesait ... de fusion. Nous démontrerons da... suite que, pour fondre 1 kilogramme ... glace, il faut dépenser 79,25 calo... Soient maintenant P le poids et ... chaleur spécifique du corps étudié ... se refroidissant il a perdu PxT c... ries. Soit d'autre part p le poids ... glace fondue; elle a absorbé une qu... tité de chaleur égale à $p.79,25$. ... égalant la perte au gain, on a

Fig. 132.



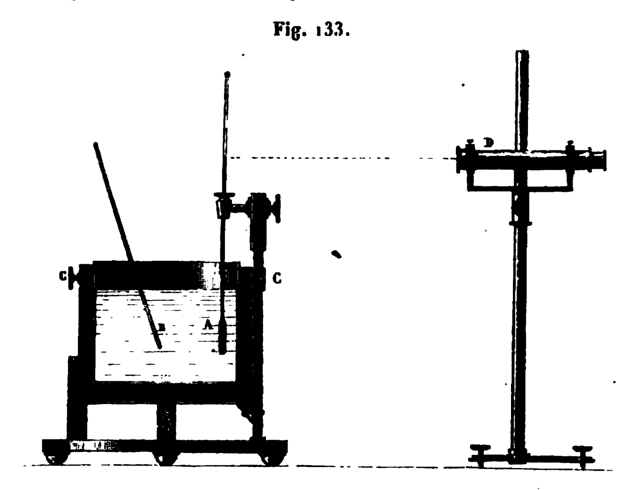
$$PxT = p.79,25.$$

Laplace et Lavoisier ont remplacé ... bloc de glace par un vase de fer-bla... composé de plusieurs compartiments ... concentriques. Au milieu on voit une grille en fils métalliques B (*fig.* 13...

ui se ferme par un couvercle; c'est dans son intérieur que se place le orps A qu'on étudie. Tout autour et au-dessus de cette grille se trouve la glace concassée C qui se fond par la chaleur que le corps abandonne qu'on recueille par un robinet F. Enfin une troisième enceinte extéeure DDD, qui elle-même est remplie de glace, empêche la chaleur xtérieure de pénétrer jusqu'au centre. Un deuxième tube E laisse écouler eau de fusion provenant de ce manchon DDD. Cet appareil n'a aucun vantage sur le précédent.

Calorimètre à eau. — C'est un vase de laiton mince (*fig.* 133) qui ontient un poids d'eau P à la température ordinaire t. On échauffe dans

Fig. 133.



ne étuve à une température T un poids p de la substance dont on veut rouver la chaleur spécifique x. On remue l'eau avec un agitateur B, ou bien on agite pendant quelque temps le corps p au moyen d'un fil qui le soutient. Alors il se refroidit depuis T jusqu'à θ et cède de la chaleur à l'eau, qui s'échauffe depuis t degrés jusqu'à la température maximum θ. On suit les variations du thermomètre A au moyen d'une lunette à colonne D.

Pendant cette opération, le corps perd une quantité de chaleur $px(\mathrm{T}-\theta)$, qui sert à échauffer de $(\theta - t)$ degrés l'eau du calorimètre, la matière du vase, de l'agitateur, du mercure, et en général de toutes les parties de l'appareil. Soient p', p'',... les poids, et c', c'',... les capacités calorifiques de ces parties; leur gain de chaleur, en y comprenant celui de l'eau, sera $(\mathrm{P} + p'c' + p''c'' + \ldots)(\theta - t)$, et nous aurons

$$px(\mathrm{T}-\theta) = (\mathrm{P} + p'c' + p''c'' + \ldots)(\theta - t),$$

ou bien

$$px(T - \theta) = P_1(\theta - t);$$

en posant $P_1 = P + p'c' + p''c'' + \ldots$; P_1 est ce que l'on nomme l'*équivalent en eau* du calorimètre et de tout ce qu'il contient.

Corrections. — Pendant que l'immersion du corps chaud élève la température du calorimètre, elle tend à s'abaisser par toutes les causes extérieures de refroidissement. Il en résulte une grave cause d'erreur sur laquelle il faut porter toute notre attention.

On commence par l'atténuer autant que possible, 1° en polissant la surface extérieure du calorimètre, ce qui rend son pouvoir émissif très-faible; 2° en le plaçant dans un deuxième vase de laiton CEEC (*fig.* 133), qui est poli intérieurement et qui lui renvoie par réflexion presque tous les rayons qu'il émet; 3° en le soutenant à sa base sur quatre fils tendus horizontalement E, E, et en le maintenant à son sommet par quatre pointes de bois CC, afin qu'il ne cède rien à ses supports.

Rumford a imaginé ensuite le procédé de compensation suivant. Il détermine approximativement, par une expérience préliminaire, le nombre de degrés $2n$ dont le calorimètre s'échauffe après l'immersion du corps; puis il fait l'épreuve définitive en employant de l'eau préalablement refroidie de n degrés au-dessous de l'atmosphère. Alors l'expérience peut se diviser en deux phases : dans la première, l'enceinte a sur le calorimètre des excès de température qui varient de n à o et lui cède de la chaleur; dans la seconde, le calorimètre a les mêmes excès sur l'enceinte et lui rend de la chaleur. La compensation entre ces échanges inverses serait parfaite si les deux périodes duraient le même temps; mais cela n'a pas lieu, car la marche ascendante des températures, d'abord très-rapide, se ralentit quand on approche du maximum, et en fin de compte il y a plus de chaleur perdue qu'il n'y en a de gagnée.

Pour compléter la correction, on emploie une méthode qui servira dans tous les cas analogues. On verse dans le calorimètre un poids d'eau égal à celui qu'il doit contenir dans toutes les expériences; on l'échauffe, et on détermine par l'expérience la fraction de degré dont elle se refroidit pendant chaque minute après un excès de température e; on trouve que cette fraction est proportionnelle à e, ou bien égale à Ae, A étant un coefficient constant.

Si ensuite on veut déterminer une chaleur spécifique et qu'on plonge un corps chaud dans le calorimètre froid, il s'échauffe peu à peu, et les excès de sa température sur l'air sont, en moyenne, pendant chaque minute successive, égaux à e, e', e'',.... Donc, la perte totale de température par le rayonnement extérieur sera

$$A(e + e' + e'' + \ldots),$$

où les quantités e pourront être d'abord négatives, ensuite positives. Il suffit

d'ajouter cette perte à l'excès final θ pour avoir celui qu'on observerait, s'il n'y avait point de refroidissement.

Emploi général du calorimètre. — Le calorimètre à glace ou à eau servira non-seulement à mesurer les chaleurs spécifiques, mais à apprécier la chaleur dégagée ou absorbée dans un cas quelconque. Lavoisier a placé, par exemple, un lapin dans son calorimètre, et la quantité de glace fondue a fait connaître la chaleur due à la respiration de cet animal. On pourra de même enfermer un foyer quelconque dans une caisse entourée d'eau, apprécier l'élévation de température θ de cette eau et conclure la chaleur cédée par le foyer. La méthode est générale et le calorimètre est un instrument aussi utile que le thermomètre, comme on le verra dans le paragraphe suivant.

III. — LA CHALEUR EST UN MOUVEMENT MOLÉCULAIRE.

On s'est fait pendant longtemps des idées très-fausses sur la nature de la chaleur. On avait supposé qu'elle consiste en un fluide incoercible, impondérable, lancé à distance par les corps chauds et pénétrant dans la matière qu'il dilate en s'y accumulant; on en a aujourd'hui une conception toute différente. Pour la bien comprendre il faut se rappeler le théorème des forces vives.

On nomme *travail* d'un corps le produit Ph de son poids par la hauteur dont il s'élève ou s'abaisse. L'unité de travail se nomme *kilogrammètre;* c'est un kilogramme élevé ou abaissé d'un mètre. Si le corps tombe de h il *dépense* Ph; il prend une vitesse v, et l'on a

$$v^2 = 2gh \quad \text{ou} \quad mv^2 = 2mgh = 2Ph;$$

mv^2 est ce qu'on nomme la *force vive;* elle est égale au double du travail Ph. On peut dire : Tout corps qui *dépense* un travail Ph *crée* une force vive équivalente.

Inversement, donnons au corps une vitesse v de bas en haut, elle diminuera, s'annulera et le corps montera de h; on aura la même relation $mv^2 = 2Ph$, et l'on dit : Tout corps qui perd de sa vitesse *dépense* de la force vive et *crée* ou *accumule* du travail. Je dis que ce travail est accumulé : il n'est point perdu, car il se retrouvera si le corps retombe, et il reproduira la vitesse v, laquelle à son tour pourra de nouveau exécuter le même travail Ph, si par un procédé quelconque on change son sens. On conçoit la possibilité d'une transformation indéfinie et sans perte du travail

en force vive et réciproquement, et on en a l'exemple dans un corp faitement élastique, tombant et retombant sur un plan.

Ce principe se généralise, et l'on peut dire qu'en dépensant un tr exprimé par T kilogrammètres on peut mettre en mouvement une s quelconque de molécules, de manière à leur communiquer une somm forces vives égale à $2T$, et que réciproquement en dépensant cette s de forces vives on peut reproduire le travail $2T$, de sorte que rien perdra.

Voici un exemple : faisons tomber sur un timbre un marteau qui dé sera un travail T. Aussitôt les molécules du timbre se mettront à vi Elles acquerront une somme de forces vives Σmv^2 égale à $2T$. Leur tesses persisteraient indéfiniment si elles étaient dans un vide absolu. Co elles sont dans l'air, il en est autrement; l'air prend à chaque oscill une partie de la vitesse du timbre; il la transmet jusqu'aux parois d salle; celles-ci la communiquent à l'édifice, au sol, à l'atmosphère e rieure. La force vive se dissémine, elle ne se perd point, et si à un mo donné, quel qu'il fût, on la réunissait, elle pourrait reproduire le tr du marteau $2T$ qui lui a donné naissance.

La même chose aura lieu pour le frottement de l'archet sur une c tendue; c'est encore un travail d'ensemble transmis et transformé, et séminé dans des vibrations sonores. Si la corde se raccourcit peu à p ces vibrations deviennent plus rapides et finissent par ne plus produir son, mais elles ne cessent pas de se faire, et le principe de la conserv de la force vive ne cesse pas d'être vrai.

Changeons maintenant quelque chose à l'expérience. Faisons tomber marteau non sur un timbre, mais sur un bloc de plomb. Il n'y aura p de vibrations sonores. Cependant comme il n'est pas possible que le t vail T ait été dépensé sans rien produire, on admet qu'il s'est encore tr formé en mouvements moléculaires très-rapides, trop rapides pour sensibles à l'oreille. Or le plomb s'est échauffé : on suppose que cette cha consiste justement dans ces mouvements, et qu'elle se dissémine com les vibrations sonores par un rayonnement tout à fait identique. Pour j tifier et généraliser cette conception, nous allons montrer par des exemp nombreux que tout organe mécanique qui absorbe du travail crée d chaleur.

Transformation du travail en chaleur. — I. Rumford ayant fait to ner rapidement par un moteur sur un coussinet de bronze une barre même métal pesant 55 kilogrammes, il se fit aux points de jonction d pièce fixe avec la barre mobile un frottement suffisant pour réduire

bronze en limaille ; il y eut une dépense considérable de travail qu'on peut assimiler à celle d'un poids P tombant d'une hauteur h ; ce travail était transformé en force vive moléculaire, c'est-à-dire en une quantité de chaleur qui fut recueillie dans un calorimètre à eau et trouvée égale à 1156 calories par gramme de limaille enlevée.

II. Si l'on fait tourner une roue à palettes dans un liquide, celui-ci oppose une résistance qui dépense une partie du travail moteur, et il s'échauffe d'autant plus que cette dépense est plus grande.

III. Quand, au moyen d'une pompe foulante, on comprime un gaz dans un récipient entouré d'eau, il oppose au jeu du piston une résistance, c'est une dépense de travail, elle est accompagnée d'un échauffement de l'eau.

Transformation de la chaleur en travail. — Ces exemples prouvent ce premier point qu'un travail mécanique dépensé peut se transformer en chaleur. Si notre théorie est fondée, la proposition réciproque sera vraie ; la chaleur, n'étant que la somme des forces vives moléculaires, pourra s'anéantir à son tour et créer une quantité de travail équivalent : c'est ce que nous allons montrer.

I. Si dans un réservoir entouré d'eau on a comprimé de l'air, et qu'on le laisse ensuite se dilater de manière qu'il soulève un piston chargé de poids, il y a création de travail, il faut qu'il y ait perte de force vive : l'eau se refroidit. Le même phénomène s'observe dans les machines à vapeur, la vapeur se refroidit pendant qu'elle chasse le piston.

II. Si on allonge une lanière de caoutchouc en la tirant vivement par ses deux bouts, elle résiste, dépense du travail et s'échauffe ; quand on la laisse ensuite se contracter par son élasticité, elle développe du travail et elle se refroidit.

III. Gay-Lussac a montré que si l'on réunit par un tube de communication deux ballons dont l'un est vide et l'autre plein d'air, la température s'élève dans le premier, où la pression augmente, et qu'elle s'abaisse dans l'autre, où la pression diminue. Les deux variations thermométriques sont égales ; il s'ensuit que la même quantité de travail détruite ou créée est accompagnée d'une quantité égale de chaleur créée ou détruite.

IV. M. Joule a modifié cette expérience de la manière suivante. Il plaça dans un calorimètre deux ballons de cuivre de même capacité, dont l'un était rempli d'air à 22 atmosphères et l'autre vide. Étant réunis par un tube à robinet, ils se mirent en équilibre de pression à 11 atmosphères, mais il n'y eut aucune variation de température dans le calorimètre, parce que la chaleur détruite par la détente dans le premier ballon était égale à celle qui était créée par la compression dans l'autre ballon, qu'il n'y avait en

8

somme ni dépense ni accumulation de travail, et qu'il ne devait y avoir aucun changement de force vive ni de chaleur. Si, au contraire, le second ballon est plein d'eau et que l'air en y entrant soit obligé de la chasser, la température s'abaisse dans le calorimètre.

Équivalent mécanique de la chaleur. — En généralisant ces résultats on est amené à dire que tout travail dépensé dans un organe mécanique produit d'abord un travail extérieur dans les corps e; qu'ensuite il les dilate ou les contracte, et qu'une portion se dépense à écarter ou à rapprocher les molécules : c'est ce qu'on nomme le *travail intérieur i*; qu'enfin une autre partie de ce travail est employée à faire vibrer rapidement les molécules, à donner à chacune d'elles une vitesse v, une augmentation de force vive $\frac{1}{2}mv^2$, et à leur ensemble $\frac{1}{2}\Sigma mv^2$, c'est-à-dire à produire une quantité de chaleur $\frac{1}{2}\Sigma mv^2$. Il faut donc qu'on ait l'équation générale

$$T = \frac{1}{2}\Sigma mv^2 + i + e.$$

Si l'on choisit des exemples où il n'y ait point de mouvements extérieurs e communiqués, ni de travail intérieur i produit, il faudra que le travail dépensé T soit exactement représenté par la chaleur créée $\frac{1}{2}\Sigma mv^2$.

Or, on ne peut pas exprimer cette chaleur en force vive, car on ne connaît pas la vitesse que prennent les molécules; on ne peut que la mesurer proportionnellement, en calories, c'est-à-dire avec une unité convenue. Soient Q cette mesure en calories, E un coefficient constant : il faut que l'on ait

$$\frac{1}{2}\Sigma mv^2 = EQ,$$

et par conséquent

$$T = EQ,$$

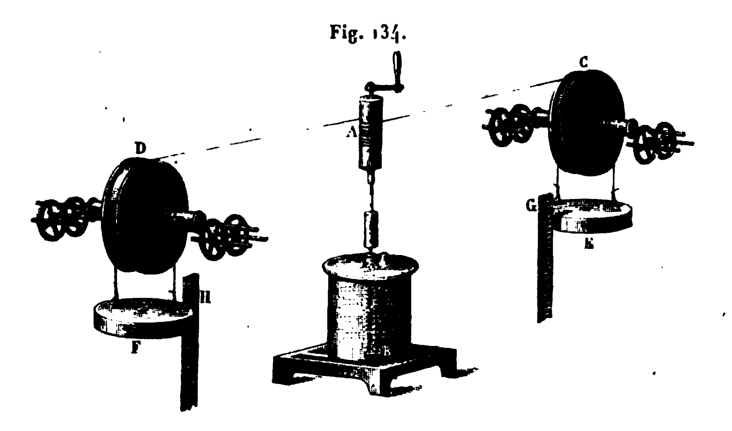
ce qui veut dire que le rapport du travail dépensé T à la chaleur créée Q doit être une quantité constante E, ou que toute quantité de travail T équivaut à une quantité de chaleur EQ, et réciproquement. Si $Q = 1$, E sera en kilogrammètres l'équivalent d'une calorie : E se nomme l'*équivalent mécanique de la chaleur*.

Mesure de l'équivalent E. — Aucune de ces prévisions n'est indiquée par la théorie qui suppose que la chaleur est un fluide. Si donc elles sont vérifiées, si les expériences donnent pour E un nombre constant, on pourra considérer la théorie mécanique comme provisoirement démontrée.

I. Un calorimètre plein d'eau ou de mercure contient une roue à palettes mobile autour d'un axe AB (*fig.* 134); elle est mise en mouvement au moyen d'un double cordon qui passe sur deux poulies C et D, et ces poulies sont sollicitées par deux poids E et F qui tombent d'une hauteur mesurée par des règles G et H. On répète vingt fois l'opération.

La chaleur produite se mesure par les méthodes calorimétriques ordinaires. Quant au travail dépensé ou détruit par la résistance du liquide,

Fig. 134.



il est égal au travail total Ph que l'on obtient en multipliant les deux poids par la hauteur qu'ils parcourent, diminué du travail ph qui est perdu par les frottements de l'appareil et qui se mesure en réunissant les poulies C et D par le cordon CD, sans le faire passer sur A, et en cherchant le poids p nécessaire pour produire la même vitesse. Cette expérience a donné, avec l'eau, $E = 424^{kgm}$, et avec le mercure, $E = 425^{kgm}$. En remplaçant la roue à palettes par un disque de fonte, tournant sur un plan fixe, M. Joule a trouvé $E = 426^{kgm}$.

II. On comprime de l'air au moyen d'une pompe foulante dans un récipient. Cette pompe et ce récipient sont plongés dans uh calorimètre à eau. Après 300 coups de piston, le gaz a atteint 22 atmosphères; on mesure la chaleur C cédée au calorimètre. C provient de la compression du gaz et du frottement du piston dans le corps de pompe. Pour évaluer cette dernière influence on recommence l'expérience en laissant le récipient ouvert, et 300 nouveaux coups de piston dégagent C′ calories; C — C′ exprime la chaleur créée par la compression du gaz.

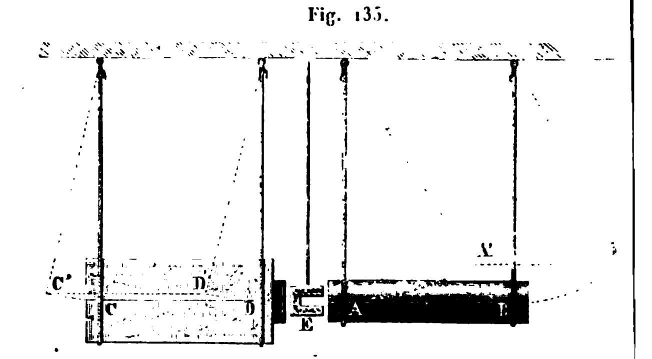
A chaque coup de piston la pression augmente d'une quantité constante et exerce sous le piston des résistances P, $P + \alpha$, $P + 2\alpha, \ldots, P_1$. Si l est la course du piston, la somme du travail dépensée est

$$T = Pl + (P + \alpha)\, l + \ldots + P_1 l = \frac{(P + P_1)\, l}{2};$$

l'équivalent mécanique sera $\frac{T}{C - C'}$: on a trouvé 444 kilogrammètres.

III. On doit à M. Hirn la détermination suivante. Un gros cylin
fonte CD (*fig.* 135) est soutenu par des cordes verticales. Son poids

Fig. 135.



En E est un morceau de plomb dont le poids et la chaleur spécifique
π et C; en AB est un deuxième cylindre horizontal de poids p. Si
soulève en A'B' d'une hauteur h et qu'on le laisse retomber com
marteau, il écrase le plomb E contre l'enclume CD. Mesurons le
perdu et la chaleur gagnée.

Le marteau étant élevé de h, son travail de chute est ph; mais p
lasticité il se relève de h'; il a donc perdu $p(h - h')$. D'autre part
clume a monté de H et a absorbé PH; le travail T définitivement ab
par le plomb est $p(h - h') - PH$.

D'autre part le plomb s'est échauffé de θ, il a gagné $\pi C\theta$, et l'éq
mécanique est égal au quotient de T par $\pi C\theta$. Ces expériences ont
425 kilogrammètres.

Les nombres que nous venons de trouver sont sensiblement égaux
eux. Il en faut conclure qu'une unité de chaleur se transforme en 43
grammètres et que 430 kilogrammètres se transforment en une un
chaleur.

Il faut conclure en outre que jusqu'à présent nous devons consid
chaleur comme une somme de forces vives moléculaires. Tous les fa
ultérieurs confirmeront cette idée.

CHAPITRE II.

PHÉNOMÈNES PRODUITS PAR L'ÉCHAUFFEMENT DES SOLIDES ET DES LIQUIDES.

D'après ce qui a été démontré au Chapitre précédent, les corps sont composés de molécules en mouvement. L'ensemble de ces molécules possède, à un moment donné, une somme de force vive qui est la chaleur qu'elles contiennent. Les échauffer, c'est augmenter cette somme; les refroidir, c'est la diminuer. Elles ressemblent à un timbre en vibration; elles transmettent leurs mouvements aux corps environnants. Inversement, ceux-ci peuvent leur en céder; lorsque l'échange est égal dans les deux sens, il y a équilibre de température, et, de deux substances en contact, celle qui a la température la plus haute est celle qui cède plus de mouvement qu'elle n'en reçoit.

L'expérience a déjà prouvé qu'en accumulant de la chaleur, c'est-à-dire en augmentant leurs mouvements moléculaires, les corps se dilatent. Cela est facile à concevoir : cela veut dire que les molécules exécutent des oscillations plus amples autour de leurs positions d'équilibre, et que par suite l'espace total qu'elles occupent s'agrandit. De même une verge qui vibre occupe entre ses positions extrêmes un espace d'autant plus grand que les oscillations sont plus étendues.

L'étude de la chaleur, privée jusqu'à ces derniers temps d'un guide théorique, a été purement empirique. On a comparé les températures entre elles par les thermomètres à mercure, c'est-à-dire par les changements de volume d'un index arbitrairement choisi, et la première question qu'on a expérimentalement étudiée a été de mesurer le changement de volume ou la dilatation de tous les corps, pendant qu'un thermomètre placé près d'eux s'élève de 1 degré.

Nous allons résumer les travaux très-nombreux que les physiciens ont exécutés sur ce sujet.

Nous mesurerons : 1° les changements de volume; 2° les variations de la densité; 3° les quantités de chaleur absorbées par les corps pendant ces changements de volume ou de densité.

I. — DILATATION LINÉAIRE.

I. On nomme *dilatation linéaire* celle que les règles éprouvent dans le sens de leur longueur, et *coefficient de dilatation linéaire* k cette dilatation pour une règle de 1 mètre de 0 à 1 degré. Soit en général une barre de longueur l, portée de 0 à 1 degré, à 2 degrés, ..., à t degrés, elle s'allonge de lk, $2lk$, ..., lkt et sa nouvelle longueur l_t est $l + lkt$:

$$l_t = l(1 + kt).$$

A une autre température t' on aura

$$l_{t'} = l(1 + kt'),$$

et si l'on veut exprimer $l_{t'}$ en fonction de l_t,

$$l_{t'} = l_t \frac{1 + kt'}{1 + kt} = l_t[1 + k(t' - t) - k^2 t(t' - t) + \ldots];$$

k étant une quantité très-petite, on pourra négliger les termes en k^2, ..., et écrire approximativement

$$l_t = l_{t'}[1 + k(t' - t)].$$

Nous montrerons dans la suite que k n'est pas une quantité absolument constante, et que ces formules ne sont qu'approchées.

II. La *dilatation superficielle* est l'augmentation de la surface d'un corps qu'on chauffe. Si une plaque homogène se dilate, elle reste semblable à elle-même; à 0 degré et t degrés ses surfaces s et s' sont proportionnelles aux carrés de ses dimensions homologues, et l'on a

$$\frac{s_t}{s} = \frac{l_t^2}{l^2} = (1 + kt)^2 = 1 + 2kt + k^2 t^2,$$

et en négligeant k^2,

$$s_t = s(1 + 2kt),$$

formule analogue à celle qui exprime l_t, avec cette différence que k est remplacé par $2k$, ce qu'on exprime en disant que le coefficient de dilatation superficielle est double du coefficient de dilatation linéaire.

III. La *dilatation cubique* est l'augmentation du volume total des corps échauffés. On admet encore ici que les volumes à t degrés et à 0 degré demeurent semblables et sont par suite proportionnels aux cubes de leurs dimensions homologues, ce qui donne

$$\frac{v_t}{v} = \frac{l_t^3}{l^3} = (1 + kt)^3,$$

et par approximation

$$v_t = v(1 + 3kt).$$

En comparant cette formule à celle de la dilatation linéaire, on voit qu'elle s'en déduit en y remplaçant k par $3k$, ce qui permet de dire que le coefficient de la dilatation cubique est trois fois celui de la dilatation linéaire.

Variation de la densité. — On se rappelle que la densité d'une substance est le poids qu'elle pèse sous l'unité de volume. Or puisqu'elle se dilate en s'échauffant, le poids de l'unité de volume, ou la densité, diminue. Soit p le poids d'un volume v à zéro, et d_0 la densité à cette température, on a

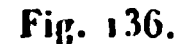
$$d_0 = \frac{p}{v};$$

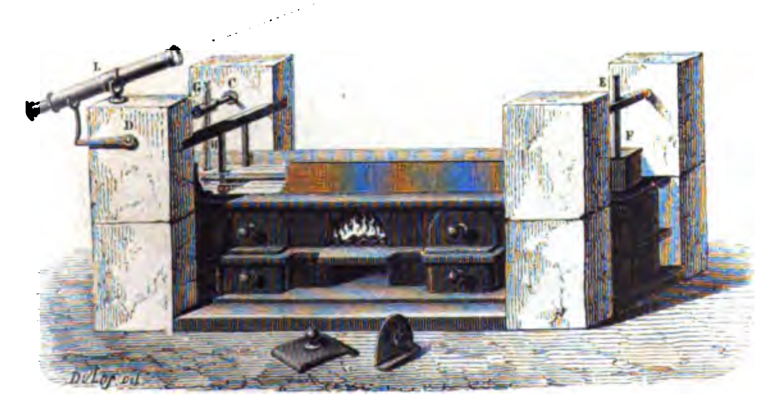
à t degrés le volume v devient $v(1 + 3kt)$, et l'on a pour la densité d_t

$$d_t = \frac{p}{v(1 + 3kt)} = \frac{d_0}{1 + 3kt},$$

formule qui lie la dilatation à la variation de densité. On pourra mesurer $3k$ et conclure la valeur de d_t ou bien mesurer d_t et d_0 et en déduire $3k$. Décrivons maintenant les procédés de mesure.

Appareil de Laplace et Lavoisier. — Laplace et Lavoisier avaient fait établir sur un massif de maçonnerie quatre bornes solides en pierre de taille (*fig.* 136); les deux premières C, D, séparées par un intervalle


Fig. 136.



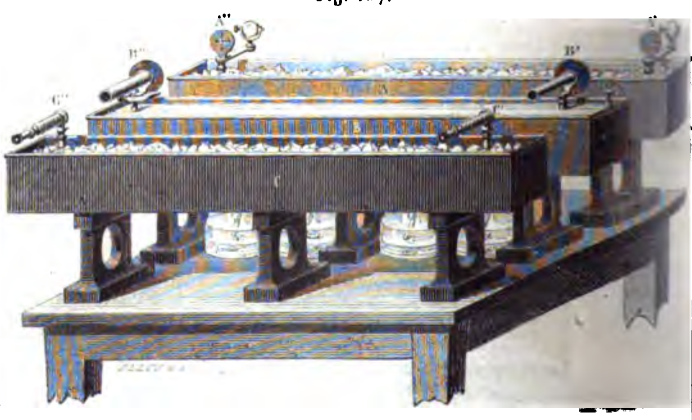
de quelques décimètres seulement, étaient reliées par des tiges de fer scellées, et les deux autres, disposées de la même manière, étaient placées à 2 mètres de distance. Entre les quatre piliers, on avait construit un long

fourneau qui servait à échauffer une auge métallique FH, dans laque couchait horizontalement la barre que l'on voulait étudier, sur des leaux de verre qui lui permettaient de glisser librement. Les deux ex mités de la barre butaient, l'une contre une règle de verre fixe EF, l contre une tige GH, mobile autour d'un axe CD. En se dilatant, la chassait devant elle la règle mobile, qui faisait tourner l'axe CD et l'intermédiaire d'un levier, la lunette L. Celle-ci visait sur une mire vert établie à une distance de 200 mètres, de manière que l'axe optique courait 744 millimètres sur la mire quand la barre se dilatait de 1 m mètre. Il n'y avait donc, pour faire une observation, qu'à mettre d de la glace dans l'auge, ensuite à remplacer la glace par de l'eau ch à une température t, à noter le nombre de millimètres parcourus se mire par l'axe de la lunette et à diviser ce nombre par 744. On ob ainsi la dilatation lkt, d'où l'on déduisait k.

Mais pour obtenir le rapport d'amplification des allongements, c'es dire le nombre 744, il fallait mesurer les bras de levier, opération délicate et sujette à des erreurs assez graves, que l'on évite par la thode suivante, due à Ramsden.

Appareil de Ramsden. — Trois auges métalliques A, B, C (*fig.* sont placées parallèlement sur des supports de fer; les deux extrêm-

Fig. 137.

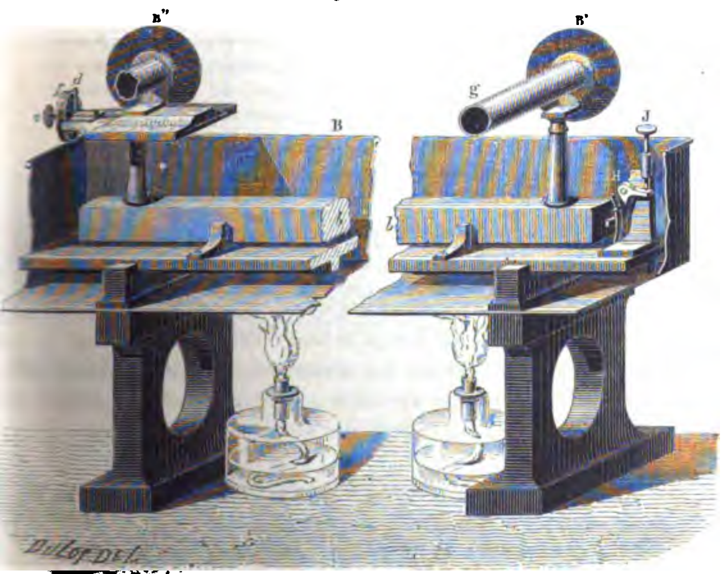


et C sont remplies de glace, et la moyenne B, qui contient de l'eau, p être chauffée par des lampes placées au-dessous d'elle. Chacune de ces auges contient une barre métallique de 2 mètres de longueur: on v que les barres extrêmes, qui sont à la température de zéro, ont une le

gueur fixe et constituent un système invariable, tandis que celle du milieu, que l'on veut étudier, étant successivement portée à des températures différentes, s'allonge ou se raccourcit. On a fixé à chaque extrémité de ces trois règles des colonnes métalliques verticales qui portent à leur sommet : 1° en A' et A'', deux réticules de fils croisés qui servent de mire et sont éclairés chacun par un petit miroir ; 2° en B' et B'', deux lentilles enfermées dans des tubes, lesquelles reçoivent la lumière partant des fils croisés ; 3° enfin, en C' et C'', des loupes au foyer desquelles sont disposés deux autres réticules de fils croisés que l'œil, placé successivement derrière les deux loupes, aperçoit distinctement en même temps que les images des réticules A', A'', formées par les lentilles B', B''. Le moindre allongement de la barre moyenne, en déplaçant ces lentilles, détruira la coïncidence des réticules.

On amène les trois auges à la même température de zéro, puis on règle la barre moyenne à l'aide de pièces spéciales représentées en détail (*fig.* 138) ;

Fig. 138.



l'extrémité B' vient buter contre un levier que l'on pousse par une vis extérieure J et qui sert à maintenir cette extrémité dans une position invariable. A l'autre extrémité se trouve une vis micrométrique qui apprécie $\frac{1}{200}$ de millimètre et qui permet de déplacer la lentille B''. Quand on chauffe

alors l'auge B, la lentille B″ s'éloigne par l'effet de la dilatation; mais on la ramène par la vis micrométrique, et le nombre de tours et de fractions de tour qu'il faut faire mesure l'allongement de la règle.

Nous résumons ces recherches par un tableau des dilatations des substances les plus usuelles.

Tableau des coefficients de dilatation linéaire.

Bois de sapin	de	0,000 003	à	0,000 005
Verre blanc		0,000 007		0,000 009
Flint-glass		0,000 008		0,000 009
Granit		0,000 008		0,000 009
Platine		0,000 008		0,000 010
Palladium		0,000 010		
Antimoine		0,000 011		
Fonte de fer		0,000 010		0,000 011
Fer		0,000 011		0,000 013
Acier non trempé		0,000 011		0,000 012
Acier trempé		0,000 012		0,000 014
Bismuth		0,000 014		
Or		0,000 014		0,000 015
Cuivre rouge		0,000 017		0,000 019
Cuivre jaune		0,000 018		0,000 021
Argent		0,000 019		0,000 021
Soudure (2 cuivre, 1 zinc)		0,000 020		
Étain		0,000 019		0,000 025
Aluminium		0,000 022		
Soudure blanche (1 ét., 2 pl.)		0,000 025		
Plomb		0,000 028		0,000 029
Zinc		0,000 029		0,000 034

Les métaux martelés ou passés à la filière se dilatent beaucoup plus sous l'influence de la chaleur que lorsqu'ils sont à l'état naturel; c'est ce qui explique les grandes variations qui se rencontrent dans ce tableau. Nous ferons connaître dans la suite une autre méthode pour trouver directement les coefficients de dilatation cubique des solides.

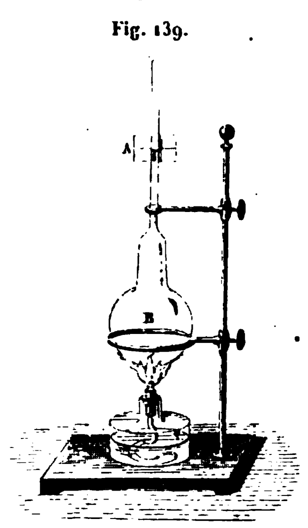
II. — DILATATION ABSOLUE ET APPARENTE DU MERCURE.

Quand on veut mesurer la dilatation des liquides on rencontre une difficulté particulière.

Concevons qu'un vase de forme et de matière quelconque soit rempli par un noyau formé de la même substance, nous aurons un solide con-

et si nous le chauffons, toute la masse se dilatera sans que le noyau de remplir exactement l'enveloppe. La capacité intérieure du vase ıvera donc la même dilatation que le volume extérieur du noyau; et ·st cette capacité à zéro, elle sera $v(1+3kt)$ à t degrés. Maintenant, ituons par la pensée un liquide au noyau solide; il se dilatera lui-e par la chaleur, mais l'expansion du vase fera baisser son niveau › certaine quantité, et l'on voit par là que la dilatation apparente d'un liquide dans un vase est la différence entre la dilatation absolue de ce liquide et la dilatation d'un volume égal de la matière de l'enveloppe.

Fig. 139.



On peut rendre sensible la dilatation des vases en remplissant d'eau un ballon de verre terminé par un tube capillaire (*fig.* 139). Le niveau étant d'abord en A, on plonge le vase dans un bain chaud; aussitôt, le ballon prend la température du bain et se dilate avant que la chaleur ait pu se communiquer au liquide intérieur, et l'on voit baisser le niveau A. Mais cet effet n'est que passager, car bientôt le liquide s'échauffe aussi, se dilate plus que l'enveloppe, le niveau remonte et dépasse A.

Pour trouver la dilatation absolue s liquides, on peut d'abord chercher un procédé indépendant de cette .atation des vases. Voici celui qui a été employé par Dulong et Petit.

Dilatation absolue du mercure. — Un poids P de mercure occupe à ·ro et à t degrés des volumes v_0 et v_t, auxquels correspondent les den-tés d_0, d_t, et l'on a

$$P = v_0 d_0 = v_t d_t,$$

u bien, en désignant par δ_t la dilatation totale,

$$\frac{d_0}{d_t} = \frac{v_t}{v_0} = 1 + \delta_t.$$

Maintenant, on se rappelle que si les deux branches d'un vase commu-iquant contiennent des liquides inégalement denses, les hauteurs des ni-eaux sont en raison inverse des densités. Par conséquent, si l'on verse lu mercure dans les deux branches, qu'on refroidisse l'une jusqu'à zéro et

qu'on échauffe l'autre jusqu'à t, les densités seront d_0 et d_t, les h
des niveaux h_0 et h_t, et l'on aura la relation

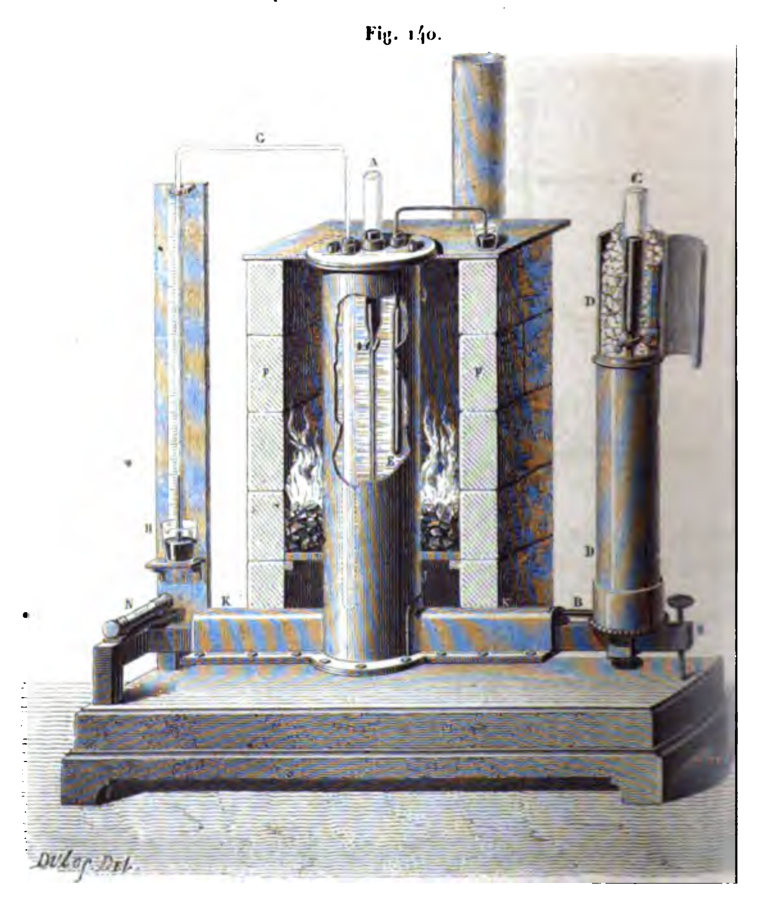
$$\frac{h_t}{h_0} = \frac{d_0}{d_t} = 1 + \delta_t,$$

d'où l'on tire

$$\frac{h_t - h_0}{h_0} = \delta_t.$$

La détermination de δ_t se trouve ainsi ramenée à la mesure de

Fig. 140.



teurs h_0 et h_t, et puisque ces hauteurs ne varient pas avec la form
vase communiquant, elles ne dépendent pas de sa dilatation. Tel e

ıncipe des expériences de Dulong et Petit. Voici comment elles ont été ılisées.

Une barre de fer MN ayant la forme d'un T (*fig.* 140) et rendue horiıtale par des vis calantes, supporte le tube communiquant ABC. Ce tube t très-étroit, excepté aux deux extrémités A et B, où son diamètre est 2 centimètres, afin d'éviter l'influence de la capillarité. Un manchon de ton DD, qui entourait la branche C, était rempli de glace; il avait à son ımmet une porte que l'on ouvrait à la fin de l'expérience, afin de pouvoir lever un peu de glace et découvrir le niveau du mercure. Un autre ıanchon JJ, qui devait être porté à une température élevée, était fabriqué cuivre battu, épais et boulonné. Il y avait à la base deux prolongements , K qui enveloppaient le tube et le T, et le fond était fermé avec du astic de vitrier. Le couvercle était percé de trois trous, l'un central ›ur laisser passer le tube A, et les deux autres latéraux pour introduire ›s thermomètres à l'intérieur. Enfin ce manchon était rempli d'huile, que ›n chauffait par un fourneau.

Les hauteurs se mesuraient au moyen du cathétomètre qui avait été ·écisément inventé à cette occasion. On visait les sommets du mercure, abord dans le tube chaud, ensuite dans la branche refroidie, et la course › l'instrument donnait $h_t - h_0$. Ensuite on mesurait la distance de ce derer sommet à l'axe du tube B, ce qui faisait connaître h_0, et l'on pouvait ılculer le quotient $\frac{h_t - h_0}{h_0}$, qui est égal à la dilatation δ_t ou à kt.

La température était donnée par le thermomètre à mercure et par un ıermomètre à air, qui sera décrit dans la suite.

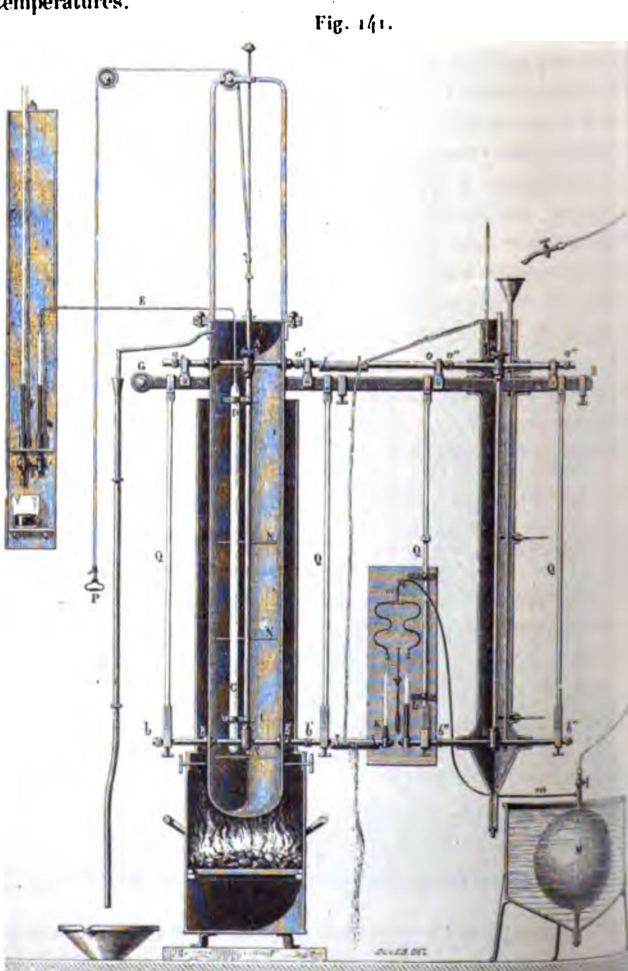
Voici maintenant les résultats des expériences faites d'abord dans le voiınage de 100 degrés, puis vers 200 et vers 300 degrés. En divisant la ilatation observée respectivement par 100, par 200 et par 300, on a obenu le coefficient moyen k.

Thermomètre à air.	Thermomètre à mercure.	Coefficient moyen k.
o	o	
100	100,00	$\frac{1}{5550} = 0{,}000\,180\,2$
200	202,95	$\frac{1}{5425} = 0{,}000\,184\,3$
300	307,62	$\frac{1}{5300} = 0{,}000\,188\,7$

On peut remarquer que le coefficient moyen, au lieu d'être constant, ıugmente d'une manière sensible avec la température. Jusqu'à présent, ıous avions admis que la dilatation était proportionnelle à la température, ›u, ce qui revient au même, que k était constant; les expériences de

Dulong et Petit nous montrent que la formule $v_t = v_0(1 + kt)$ n
rigoureusement applicable au mercure. Mais nous voyons aussi
variation de k est assez faible pour qu'il soit permis d'employer cette
mule toutes les fois que les températures du mercure ne subiront
grandes variations, en donnant à k la valeur moyenne qui convient
températures.

Fig. 141.



Les expériences précédentes ne sont ni assez nombreuses ni assez

prochées pour nous faire découvrir la loi de variation du coefficient k. Il était donc à désirer qu'on pût les reprendre et les multiplier. C'est ce qu'a fait M. Regnault en conservant le principe de la méthode, mais en modifiant considérablement les appareils et évitant quelques causes d'erreur.

Expériences de M. Regnault. — L'appareil de M. Regnault se compose de tubes de fer forés (*fig.* 141). Deux d'entre eux AA', BB' sont verticaux; en les réunissant, deux tubes horizontaux AB, A'B' complètent un cadre rectangulaire de canaux en communication, suspendu à une barre de fer horizontale GH par quatre étriers et par quatre tirants métalliques Q, Q, Q, Q.

Un manchon de tôle galvanisée enveloppait BB', et un filet d'eau y maintenait une température basse et constante; arrivée en B, cette eau remontait par le haut et refroidissait les deux conduits horizontaux. Le tube AA' était entouré d'une chaudière percée de trous qui laissaient passer les branches horizontales et remplie d'huile dont on rendait la température uniforme par des agitateurs N, N. Cette température se mesurait par un thermomètre à air CDE.

Les hauteurs des deux colonnes de mercure, dont les pressions se font équilibre, sont déterminées de la manière suivante. Le tube inférieur A'B' est interrompu vers son milieu, et les deux parties séparées par cette interruption se raccordent avec deux tubes de verre K et L, ouverts à leur sommet, réunis dans un conduit unique *mm*, et mis en communication avec un ballon M rempli d'air que l'on comprime pour faire descendre le mercure en K et L et le faire monter en A' et B'. On cesse d'augmenter la pression quand le mercure vient affleurer à une ouverture *o* percée dans le tube AB, et par laquelle la pression atmosphérique s'exerce dans l'appareil. A ce moment, on observe les hauteurs des sommets K et L, et celles des colonnes AA' et BB' au-dessus des branches horizontales A' et B'. Il y a alors équilibre entre les pressions exercées des deux côtés, et cela s'exprime en égalant la longueur de la colonne BB', diminuée de la différence des sommets K, L, à la hauteur de AA' réduite à la température du filet d'eau, que nous supposons être zéro :

$$BB' + K - L = \frac{AA'}{1 + \delta_t}.$$

C'est ainsi que M. Regnault a déterminé δ_t pour une série de températures comprises entre 25 et 350 degrés; il a trouvé que les dilatations observées du mercure pouvaient se représenter par la formule

$$\delta_t = 0{,}000\,179\,01 . t + 0{,}000\,000\,025\,231 . t^2.$$

Pour $t = 100$ degrés, cette formule donnerait

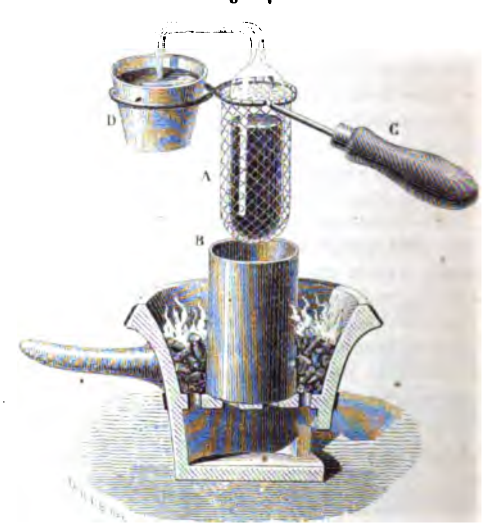
$$\delta_{100} = 0{,}018\,153.$$

Dilatation apparente du mercure. — Maintenant qu'on connaît la dilatation absolue δ_t on va chercher l'augmentation apparente du mercure chauffé dans un vase de verre. On se sert à cet effet du thermomètre à poids.

Un vase cylindrique de verre A, qui se termine par un tube re
est d'abord pesé, et ensuite chauffé dans un fourneau B, pendant
pointe du tube plonge dans un godet D plein de mercure (*fig.* 142



Fig. 142.



du vase se dilate alors et s'échappe à travers le godet, et si l'on
l'instrument pour le laisser refroidir, la contraction de l'air perm
mercure d'y pénétrer et de le remplir peu à peu. On chasse les der
bulles d'air en chauffant le vase jusqu'à faire bouillir le mercure i
troduit, et quand il est refroidi et entièrement rempli, on le place da
la glace pilée et on attend qu'il ait pris la température de zéro, ce
lieu au bout d'un quart d'heure. Soient P le poids du mercure conten
le vase, v_0 son volume; on vide le godet D.

On chauffe ensuite l'appareil à t degrés dans une enceinte quelco
Le volume du mercure devient v', celui du vase v; il sort une quanti
mercure dont le volume est $v' - v$ et le poids p; il en reste un vol
et un poids $P - p$.

On appelle *dilatation apparente* Δ_t la quantité $\frac{v' - v}{v}$: ce serait la di
tation absolue si v était égal à v_0. On a

$$\Delta_t = \frac{v' - v}{v} = \frac{p}{P - p}.$$

Dulong et Petit ont trouvé que, dans le verre ordinaire, la valeur de Δ_t est proportionnelle à la température et qu'on a

$$\Delta_t = \frac{t}{6480};$$

mais ce nombre est variable avec les diverses espèces de verres.

On verra dans le Chapitre qui suit quel parti on a pu tirer de la connaissance des deux dilatations du mercure.

III. — DILATATION DES SOLIDES ET DES LIQUIDES EN GÉNÉRAL, MAXIMUM DE DENSITÉ DE L'EAU.

Le thermomètre à poids a des usages très-nombreux. Il sert d'abord à mesurer la température. En effet, si l'on a déterminé p et P, on tire de l'équation précédente

$$t = 6480 \frac{p}{P - p}.$$

Dilatation des solides. — Il sert en second lieu à trouver la dilatation k_t du verre. En effet il faut se rappeler que v' et v sont les volumes dilatés du mercure et du verre et qu'on a $v' = v_0(1 + \delta_t)$, $v = v_0(1 + k_t)$. On a successivement

$$\frac{p}{P - p} = \frac{v' - v}{v}, \quad \frac{P}{P - p} = \frac{v'}{v}, \quad \frac{P}{P - p} = \frac{1 + \delta_t}{1 + k_t}.$$

On connaît δ_t par les expériences de M. Regnault. On mesure p et P; on en conclut la dilatation cubique du verre ou, en général, du vase qui contient le mercure. Dulong et Petit, d'une part, et M. Regnault, de l'autre, ont trouvé les valeurs suivantes :

DILATATION CUBIQUE.

De zéro à	Fer.	Platine.	Cuivre.
100°	$\frac{1}{28\,200}$	$\frac{1}{37\,700}$	$\frac{1}{17\,400}$
300	$\frac{1}{22\,700}$	$\frac{1}{36\,300}$	$\frac{1}{17\,7[illegible]0}$

	Cristal de Choisy.	Verre blanc.
10	0,000 022 7	0,000 026 3
100	0,000 022 8	0,000 027 6
350	0,000 023 4	0,000 031 3

On voit que ces coefficients augmentent avec la température; ces... mentations sont plus ou moins accentuées, suivant chaque matière... ciale.

Dilatation des liquides par le thermomètre à poids. — Après q... a mesuré la dilatation k_t de l'enveloppe, le thermomètre à poids se... déterminer la dilatation absolue d'un liquide quelconque. Il suffit d... remplir de ce liquide et d'opérer comme sur le mercure, c'est-à-dire... mesurer P et p. La formule

$$\frac{P}{P-p}=\frac{1+\delta_t}{1+k_t}$$

donnera alors la dilatation δ_t de ce liquide.

Par le thermomètre à tige. — On peut encore déterminer la d... tion absolue des liquides au moyen du thermomètre ord... (*fig.* 143). On commence par mesurer les capacités du réser... et des divisions de la tige, en pesant le mercure qui ... remplit le thermomètre jusqu'en A et celui que contient la ... depuis A jusqu'en C. On connaît ainsi les volumes du réser... AB et de la tige totale AC, par suite le volume de chaque div... et celui qui correspond à un point quelconque D de l'échelle.

Fig. 143.

Il faut maintenant chercher la dilatation k_t du verre. P... cela, on laisse dans l'appareil une quantité de mercure qu... zéro, s'arrête en A et occupe un volume v; on le chauffe jusq... t degrés, il devient $v(1+\delta_t)$, s'élève jusqu'en D, occupe ... volume BD qui était v' à zéro et devient $v'(1+k_t)$ à t degr... on aura donc

$$v'(1+k_t)=v(1+\delta_t),$$

et cette formule fera connaître k_t.

On vide maintenant le thermomètre; on y introduit le liq... dont on veut trouver la dilatation x_t, et l'on répète avec lui ... mêmes opérations; la formule

$$v'(1+k_t)=v(1+x_t)$$

donne alors x_t.

En déterminant par cette méthode les dilatations d'un grand nombre ... liquides, on a constaté qu'elles ne répondent pas rigoureusement à la for... mule $\delta_t = at$; mais qu'il faut, comme pour le mercure, employer la for... mule plus compliquée

$$\delta_t = at + bt^2 + ct^3.$$

Voici, d'après M. Is. Pierre, les valeurs des constantes a, b, c, pour quelques liquides usuels :

	a	b	c
Brome	0,001 038 186	0,000 001 711 38	0,000 000 005 447
Alcool......	0,001 048 630	0,000 001 750 96	0,000 000 001 345
Éther	0,001 513 245	0,000 002 359 18	0,000 000 040 051

Le coefficient de dilatation des liquides augmentant avec la température prend sa plus grande valeur quand on atteint l'ébullition ; au delà, ces corps changent d'état et éprouvent une dilatation subite et énorme en se vaporisant. Mais lorsqu'on empêche leur ébullition et qu'on les maintient liquides par la pression, ils se dilatent encore plus qué les gaz. Ce résultat intéressant a été constaté par M. Thilorier pour l'acide carbonique, et par M. Drion pour l'acide sulfureux et l'éther chlorhydrique.

Dilatation de l'eau. — Après cette étude générale, il est un liquide que nous devons examiner en particulier : c'est l'eau. Despretz en a étudié la dilatation par le procédé du thermomètre à tige, qui vient d'être exposé. Hällström a opéré comme il suit :

Une sphère de verre creuse, suspendue au plateau d'une balance, est plongée dans l'eau ; elle y perd un poids p, c'est le poids de l'eau déplacée. Il est égal à $vd(1+k_t)$ en désignant par v le volume de la sphère à zéro, et par d la densité de l'eau à la température de l'expérience, et par k_t la dilatation cubique du verre. On a donc

$$d = \frac{p}{v(1+k_t)}.$$

Hällström arriva à cette conclusion remarquable que la densité de l'eau commence par augmenter quand la température s'élève jusqu'à 4 degrés environ, qu'alors elle reste un moment stationnaire, et prend ensuite une marche ascendante qui ne s'arrête plus. A 4 degrés, l'eau prend donc un maximum de densité.

On sait que la densité d'un corps est égale au poids de l'unité de volume. Or, dans le système métrique, le poids de l'unité de volume d'eau prise à 4 degrés, c'est-à-dire la densité de l'eau à cette température, est égale à 1. La densité maximum de l'eau est donc égale à 1.

Pour une masse déterminée d'eau, le produit du volume par la densité est constant à toute température. Soient d et 1, v et 1 les densités et les volumes à t degrés et à 4 degrés, on aura

$$vd = 1, \quad v = \frac{1}{d}.$$

Connaissant d, cette formule permettra de calculer à toute température le volume d'une quantité d'eau qui à 4 degrés occupe un litre. Voici les nombres obtenus par Despretz :

Volumes relatifs de l'eau à diverses températures.

— 9°	1,001 631	+ 3°	1,000 008
— 8	1,001 373	4	1,000 000
— 5	1,000 699	5	1,000 008
— 2	1,000 308	8	1,000 122
0	1,000 127	9	1,000 187
+ 2	1,000 033	15	1,000 875

On voit que la dilatation de l'eau peut encore s'observer à de très-basses températures. Despretz a trouvé, en effet, qu'elle persiste à l'état liquide jusqu'à — 20 degrés, dans un tube thermométrique purgé.

On peut constater le maximum de densité de l'eau par l'expérience suivante, imaginée autrefois par Tralles et Hope, et reprise ensuite par Despretz. Un vase fermé, plein d'eau à 10 degrés, et muni de quatre thermomètres alternes (*fig.* 144), est suspendu dans l'air pendant une journée froide. Les molécules d'eau qui se refroidissent contre les parois deviennent plus lourdes et tombent au fond, pendant que les plus chaudes remontent au sommet. Par suite les thermomètres vont baisser, le n° 1 rapidement, le n° 2 moins vite, et les nos 3 et 4 très-lentement. Bientôt le premier atteindra 4 degrés, et il s'y maintiendra, puisque les molécules qui l'entourent seront arrivées alors à leur densité maxima; puis l'effet qui s'était fait sentir sur le thermomètre n° 1 se transportera au n° 2, et successivement au n° 3 et au n° 4; ils arriveront l'un après l'autre à 4 degrés. Mais le refroidissement continuant toujours, certaines parties du liquide deviennent plus légères, elles se meuvent de bas en haut. Le thermomètre n° 4, qui avait été primitivement le dernier à atteindre 4 degrés, est maintenant le premier à baisser au-dessous de ce point et à se refroidir jusqu'à zéro. Ensuite les abaissements de température se transmettent du thermomètre supérieur à l'inférieur, comme ils se propageaient précédemment de l'inférieur au supérieur.

Fig. 144.

Despretz a montré que les dissolutions salines offrent comme l'eau un maximum de densité, qui a lieu à une température inférieure à celle de leur congélation dans l'air. Ainsi, l'eau de mer, qui se congèle à — 1°,9 à

l'air libre, présente un maximum de densité à — 3°,7 lorsqu'elle est enfermée dans un tube thermométrique. Une dissolution de 74 grammes de chlorure de sodium ou de potasse dans un litre d'eau se congèle à — 4°,3 et offre un maximum de densité à — 16 degrés.

IV. — DENSITÉ DES SOLIDES ET DES LIQUIDES.

Correction des pesées. — Nous avons déjà fait remarquer que toute augmentation de volume entraîne une diminution de densité; on ne peut séparer l'étude des dilatations de celle des densités. Il faut se rappeler que le poids d'un centimètre cube d'eau est égal à 1 gramme à 4 degrés. Le poids (p) d'un volume d'eau s'exprime donc, à cette température, par le même nombre que le volume v_4,

$$(p) = v_4.$$

A t degrés, ce volume est devenu $v_t = v_4(1 + \delta_t)$, et on a

$$(p) = \frac{v_t}{1 + \delta_t}.$$

Les volumes v_t sont donnés page 132 et serviront à calculer le poids (p).

Un corps de volume v qui pèse (P) grammes dans le vide, perd dans l'air le poids d'un égal volume d'air, ou $v\alpha$, en désignant par α le poids d'un centimètre cube d'air; le poids du corps devient P, et on a

$$P = (P) - v\alpha.$$

A zéro et à 760 millimètres, α vaut 0gr,001293. Ce poids change avec la température, la pression et l'état hygrométrique de l'air. Mais d'une part, $v\alpha$ est très-petit par rapport à P, et de l'autre, les corrections qu'il faut faire à α sont très-faibles par rapport à sa propre valeur; on peut donc les négliger et prendre pour α sa valeur normale. Remplaçons v par $\frac{(P)}{d}$, en désignant par d la densité du corps, et nous aurons

$$P = (P)\left(1 - \frac{\alpha}{d}\right) = (P)(1 - \sigma).$$

En calculant la correction σ qu'il faut faire à un kilogramme pour la *réduction au vide*, on trouve pour diverses matières les valeurs suivantes :

Platine........	0gr,060	Laiton........	0gr,134
Plomb.........	0,114	Aluminium....	0,504

Les poids notés qui servent à peser les corps n'ont de valeur fixe que dans le vide. C'est cette valeur (P) qui est marquée sur le poids; celle qu'ils ont dans l'air est P ou $(P)(1 - \sigma)$. Il faut donc, après une pesée, diviser le résultat par $(1 - \sigma)$. Cette correction est rarement nécessaire.

Densité. — La densité d_t d'un corps à t degrés, dont le volume est v_t, sera le

rapport de son poids absolu, c'est-à-dire mesuré dans le vide, à son volume.

$$d_t = \frac{(P)}{v_t}.$$

Si l'on prend un volume d'eau v_t à la température de 4 degrés, il aura un poids (p') égal à v_t, et on pourra écrire

$$d_t = \frac{(P)}{(p')};$$

la densité est donc égale au rapport du poids du corps à celui d'un égal volume d'eau prise à 4 degrés. Elle change avec la température ; en effet, le volume v_t qui est v à zéro, devient $v(1+kt)$ à t degrés, et nous avons

$$d = \frac{(P)}{v}, \quad d_t = \frac{(P)}{v(1+kt)};$$

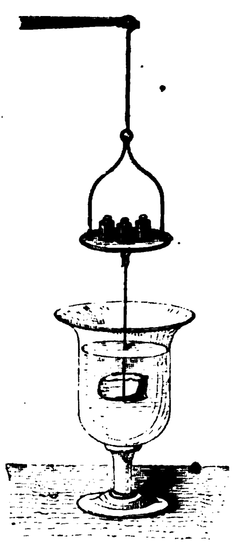
par suite

$$d_t = \frac{d}{1+kt}.$$

Si donc on connaît la densité à zéro d et le coefficient de dilatation k, on la calculera à toute température t. Il suffit donc de chercher d. Pour éviter la mesure des températures, ce qui est toujours difficile, nous supposerons que, dans toutes les opérations, les liquides aient été *amenés à zéro*.

Densité des solides. — On mesure la densité des corps solides par trois procédés, que nous examinerons successivement.

Fig. 145.



1° *Procédé de la balance hydrostatique.* — Ayant placé le corps dans un des plateaux d'une balance (*fig.* 145), on l'équilibre avec une tare mise du côté opposé ; on le remplace par des poids notés (P), ce qui donne son poids. Ensuite on le suspend au même plateau par un fil très-délié, on l'équilibre, on le plonge dans l'eau à zéro. L'équilibre est rompu, mais on le rétablit en ajoutant le poids (P'). (P') est le poids de l'eau déplacée. Si l'on néglige les corrections, on a

$$d = \frac{(P)}{(P')}.$$

Calculons exactement cette expérience. La tare fait équilibre successivement : 1° au poids apparent $vd - v\alpha$; 2° à la valeur dans l'air des poids notés qui remplacent le corps, ou à $(P)(1-\sigma)$, ce qui donne

$$(1) \qquad vd - v\alpha = (P)(1-\sigma);$$

3° au poids vrai vd du corps, diminué du poids vrai $\frac{v}{1+\delta_0}$ d'un égal volume d'eau

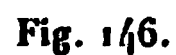
à zéro, et augmenté du poids apparent additionnel $(P')(1-\sigma)$, ce qui donne

$$(2)\qquad vd - v\alpha = vd - \frac{v}{1+\delta_0} + (P')(1-\sigma).$$

En éliminant v entre les équations (1) et (2), on trouve

$$d = \frac{(P)}{(P')}\,\frac{1}{1+\delta_0} - \frac{(P)-(P')}{(P')}\,\alpha.$$

2° *Procédé du flacon.* — On souffle à la lampe d'émailleur un petit flacon à parois minces, à goulot large, qui se ferme au moyen d'un bouchon creux rodé à l'émeri et qui se continue par un prolongement tubulaire très-fin (*fig.* 146). Après l'avoir rempli d'eau à zéro jusqu'à un niveau fixe, on le place sur un plateau de la balance avec le corps dont on cherche la densité, et dont le poids est (P), et on équilibre le tout. Cela fait, on débouche le flacon et l'on y fait entrer le corps, ce qui en fait sortir un volume égal d'eau. On replace le flacon sur le plateau et on rétablit l'équilibre en ajoutant un poids (P′), qui est celui de l'eau expulsée, et par conséquent celui d'un volume d'eau égal au volume du corps. On a la densité en divisant (P) par (P′).


Fig. 146.



Pour remplir exactement le flacon jusqu'à un repère marqué sur le tube, on le plonge dans un vase plein d'eau et on le bouche au sein du liquide en pressant légèrement le bouchon, avec un effort toujours égal; ensuite on le retire, on l'essuie avant d'opérer et on éponge l'excès du liquide resté dans le bouchon avec un tortillon de papier joseph. S'il y a des bulles d'air qui s'attachent aux fragments du corps que l'on met dans le flacon, on les chasse soit en chauffant le flacon sur une lampe à alcool jusqu'à l'ébullition de l'eau, soit en y faisant le vide.

Pour calculer exactement la densité, il faut d'abord trouver le poids du corps comme précédemment, ce qui donne l'équation

$$(1)\qquad vd - v\alpha = (P)(1-\sigma).$$

En second lieu, on a plongé le corps dans le flacon. Il perdait dans l'air un poids $v\alpha$; il fait sortir un poids d'eau égal à $\frac{v}{1+\delta_0}$, la perte totale du poids est donc $\frac{v}{1+\delta_0} - v\alpha$; elle est égale à la valeur apparente $(P')(1-\sigma)$ du poids additionnel, et on a

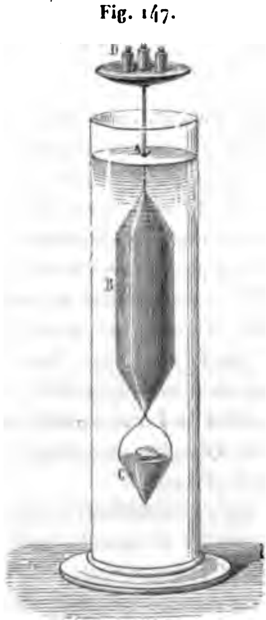
$$(2)\qquad (P')(1-\sigma) = \frac{v}{1+\delta_0} - v\alpha.$$

En éliminant v entre (1) et (2), on trouve comme précédemment

$$d = \frac{(P)}{(P')}\,\frac{1}{1+\delta_0} - \frac{(P)-(P')}{(P')}\,\alpha.$$

3° *Procédé de l'aréomètre.* — Ici la balance est remplacée par l'aréomètre de Nicholson. C'est un vase creux et léger B (*fig.* 147) de cuivre ou de fer-blanc verni, surmonté par une tige métallique fine et terminé par une coupe D qui a la forme et l'usage d'un plateau de balance; enfin il est lesté par un poids inférieur C qui le tient en équilibre verticalement dans l'eau et sur lequel on voit une seconde coupe horizontale. Placé sur l'eau, cet appareil plonge partiellement et s'enfonce progressivement quand on le charge de poids graduellement croissants. Pour un poids a, il affleure jusqu'à un trait A marqué sur la tige; ce poids, qui est à peu près constant, et ce trait A se nomment *poids* et *point d'affleurement.*

Fig. 147.



Pour avoir la densité d'un corps de poids (P), nous plaçons celui-ci dans la coupe supérieure et nous ajoutons ce qu'il faut de poids notés (p) pour amener l'affleurement en A; à ce moment la charge totale (P) + (p) est égale au poids d'affleurement a; on a donc

$$(\mathrm{P}) = a - (p).$$

Sans rien changer à l'appareil, on enlève le corps qui était sur la coupe, et on le place dans le liquide sur le contrepoids C; il perd un poids (P′) égal à celui d'un égal volume d'eau, ce qui fait remonter l'aréomètre; on reproduit l'affleurement en ajoutant des poids notés qui sont égaux à (P′); alors la densité d se calcule par la formule

$$d = \frac{a - (p)}{(\mathrm{P}')}.$$

Quand la tige est très-mince, les moindres variations de poids suffisent pour augmenter ou diminuer beaucoup la hauteur de l'affleurement; aussi l'appareil de Nicholson est-il une balance fort sensible dont on pourrait tirer un bon parti si elle n'était soumise à des causes de perturbation inévitables, et en particulier à des actions capillaires qui se produisent le long de la tige et contre les parois du vase : c'est un instrument qui donne rapidement la densité approximative d'un corps, ce n'est pas un appareil de précision.

Si les corps sont poreux, comme la craie, il faut commencer par les pe-

ser, puis les vernir avant de les plonger dans l'eau, ce qui, sans augmenter leur volume, les empêche de s'imbiber et rend l'opération possible. S'ils sont solubles, on les placera dans l'huile et l'on conduira l'expérience absolument comme on vient de le faire dans l'eau. Leur poids (P) dans l'air est égal à vd, le poids (P″) d'un volume égal d'huile sera vd', et l'on aura

$$\frac{(\mathrm{P})}{(\mathrm{P}'')} = \frac{vd}{vd'}, \quad d = d' \frac{(\mathrm{P})}{(\mathrm{P}'')}.$$

On calculera donc la densité d du corps si l'on a déterminé à l'avance la densité d' de l'huile dont on se sert.

Densité des liquides. — Il y a trois procédés généraux, qui correspondent aux précédents.

I. On suspend au plateau d'une balance, par un fil mince, une masse quelconque, par exemple une sphère de verre, et on l'équilibre (*fig.* 145, p. 134).

On la plonge dans le liquide à zéro dont on cherche la densité, et l'on rétablit l'équilibre en ajoutant dans le plateau qui la porte un poids (P); c'est le poids d'un volume de liquide égal à celui de la sphère plongée.

On essuie cette sphère, et l'on répète la même opération dans l'eau; on obtient le poids (P′) d'un volume d'eau égal à celui de la masse plongée. La densité est

$$d = \frac{(\mathrm{P})}{(\mathrm{P}')}.$$

Pour avoir la densité exacte, il faut se rappeler que le corps suspendu pèse dans l'air $vd - v\alpha$, dans le liquide $vd - vx$, en désignant par x la densité cherchée. La différence, ou $vx - v\alpha$, représente la valeur dans l'air du poids (P) qui rétablit l'équilibre, ou $(\mathrm{P})(1 - \sigma)$; donc

$$vx - v\alpha = (\mathrm{P})(1 - \sigma).$$

Pour l'eau à zéro, on a

$$\frac{v}{1 + \delta_0} - v\alpha = (\mathrm{P}')(1 - \sigma),$$

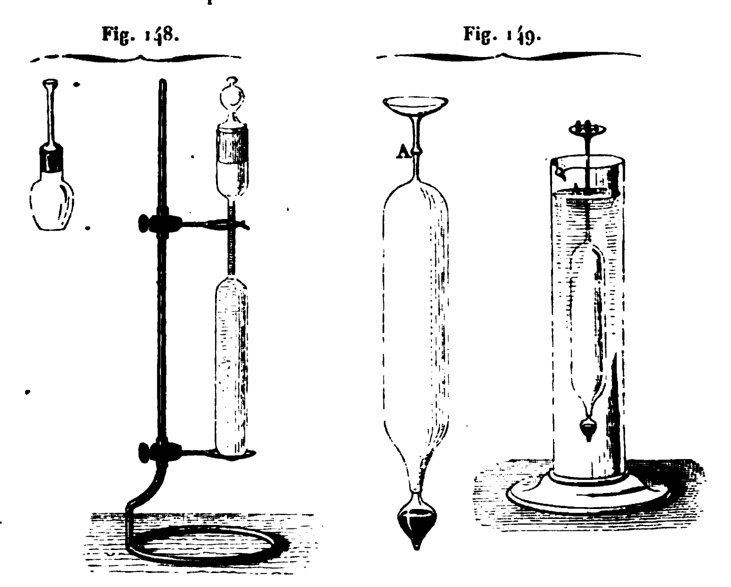
et en éliminant v, on trouve la valeur de x:

$$x = \frac{(\mathrm{P})}{(\mathrm{P}')} \frac{1}{1 + \delta_0} - \frac{(\mathrm{P}) - (\mathrm{P}')}{(\mathrm{P}')} \alpha.$$

II. On se sert d'un petit flacon à goulot mince (*fig.* 148), fermé par un bouchon tubulaire terminé en pointe fine; on l'équilibre dans une balance; on l'emplit ensuite de liquide, et l'on trouve une augmentation de poids égal à (P); c'est le poids du liquide enfermé dans le flacon. Dans l'eau, on trouve (P′).

Le rapport de (P) à (P') exprime la densité brute. La correction se fa comme dans le cas précédent.

Fig. 148. Fig. 149.



III. L'aréomètre de Fahrenheit (*fig.* 149) est tout semblable à celui de Nicholson; la seule différence est que le contre-poids est fixe et ne porte pas de plateau. On le pèse d'abord dans une balance, il a un poids a; on le plonge ensuite dans le liquide, et l'on y ajoute un poids p pour produire l'affleurement; alors l'appareil pèse $a+p$, et puisqu'il est en équilibre, ce poids est celui du liquide déplacé.

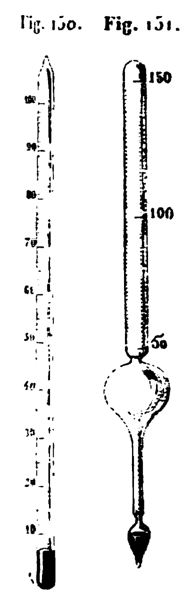
En répétant la même expérience avec l'eau, il faut un poids additionnel p'; $a+p'$ est le poids d'un volume d'eau égal à celui de l'aréomètre, et l'on a

$$d = \frac{a+p}{a+p'}.$$

Aréomètres à volume variable. — Les aréomètres de Fahrenheit et de Nicholson sont disposés de manière à s'enfoncer toujours d'une même quantité dans les liquides, ce sont des appareils à volume constant; on les charge d'ailleurs de poids différents pour obtenir le même affleurement dans les divers liquides, ils sont donc à poids variables. On a construit d'autres aréomètres avec des conditions inverses, à volume variable et à poids constants. Ce sont des tubes de verre lestés dans le bas par

du plomb ou du mercure, quelquefois cylindriques (*fig.* 150), le plus souvent renflés au-dessus du contre-poids (*fig.* 151), et terminés par une tige dont le diamètre extérieur est aussi égal que possible. Cette tige est creuse et porte, sur une bande de papier collée à l'intérieur, la graduation de l'appareil. Plongés dans différents liquides, ces instruments affleurent à des hauteurs inégales, ils peuvent conséquemment servir à des usages multipliés que nous allons faire connaître.

Fig. 150. Fig. 151.



Volumètres. — Ils peuvent servir à mesurer les densités des liquides. Plongeons l'un d'eux dans l'alcool, par exemple; il perd tout son poids P, puisqu'il nage, et c'est le poids du volume v de l'alcool qu'il déplace; plongé dans l'eau, c'est encore le même poids qu'il perd, mais c'est un autre volume v' qu'il déplace et qui pèse P; comme les densités sont en raison inverse des volumes occupés par un même poids, on a

$$d = \frac{v'}{v}.$$

La seule chose qu'il y ait à faire pour graduer l'instrument sera donc de mesurer et de marquer sur la tige le volume compris entre chaque point et la base de l'aréomètre.

Pour avoir ces volumes aisément et sûrement, il suffit de donner à l'appareil une forme géométrique simple ; c'est dans ce but que Gay-Lussac prit un tube de verre sans renflement, choisi parmi les plus cylindriques (*fig.* 150). Il le fermait en A et traçait sur la surface, à partir de la base, des divisions équidistantes qui sont proportionnelles aux volumes; il y versait ensuite la quantité de mercure nécessaire pour le faire enfoncer jusqu'au point 100 dans l'eau et fermait le sommet à la lampe. Supposons que l'instrument affleure dans un liquide à la division 75, la densité sera $\frac{100}{75}$, et en général $\frac{100}{n}$. On voit que l'appareil ne mesure pas directement les densités, mais les volumes de même poids; il se nomme *volumètre* pour cette raison. Mais il est très-facile de faire à l'avance le calcul de la densité correspondante à chaque affleurement et d'en inscrire la valeur à côté de chaque division. Le renflement que portent les aréomètres, et qui est destiné à les raccourcir, rend leur graduation plus difficile. Voici comment on peut opérer. On leste l'instrument avec un contre-poids provisoire qui

le fait affleurer au bas de la tige et lui donne un poids total p. On y ajoute ensuite des quantités p, $2p$,... de mercure, ce qui double ou triple le poids, et aussi les volumes plongés. Les trois affleurements successifs correspondent donc à des volumes 1, 2, 3, et l'on y marque les divisions 50, 100, 150 (*fig.* 151), puis on divise les intervalles qui les séparent en 50 parties égales; on donne à l'appareil un poids définitif $2p$. Il s'arrête au point 100 dans l'eau, et on l'emploie comme le volumètre précédent.

Aréomètre de Baumé. — L'aréomètre sert à juger le degré de concentration des acides, des solutions salines, des sirops, des alcools, etc., ou la proportion d'eau mêlée aux liqueurs. Baumé gradua d'une manière uniforme un appareil général marquant zéro dans l'eau et 15 dans un liquide composé de 15 parties de sel et 85 d'eau. La division était ensuite prolongée au delà. Cet appareil marque 66 degrés dans l'acide sulfurique monohydraté, 36 dans l'acide azotique, etc.

Quand il faut comparer les substances moins denses que l'eau, on fait inversement la graduation : on marque zéro dans une dissolution à 10 centièmes de sel marin et 10 dans l'eau, puis on prolonge la division en remontant; c'est le pèse-liqueur qui indique 36 dans l'alcool du commerce. Ses indications sont malheureusement conventionnelles.

Alcoomètre centésimal — Gay-Lussac a gradué l'aréomètre de façon à indiquer d'une manière précise les proportions d'eau et d'alcool absolu que renferment les mélanges du commerce.

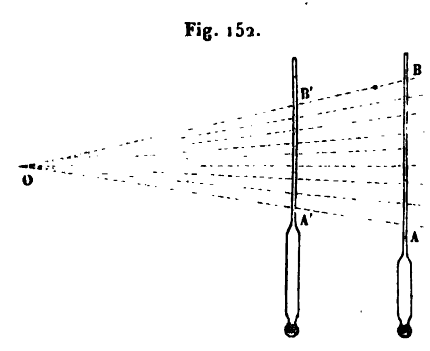
On prépare divers mélanges en mettant dans des vases gradués 0,10; 0,20; 0,30;...; 1,00 d'alcool absolu, puis on achève de les remplir avec de l'eau distillée, ce qui fait un volume total égal à 1. On plonge d'abord l'aréomètre dans l'alcool absolu, on le leste de façon qu'il s'y enfonce en totalité et l'on marque 100 au point d'affleurement. On le plonge ensuite successivement dans les divers mélanges, et sur les affleurements successifs on marque la proportion d'alcool que les dissolutions contiennent, c'est-à-dire 10, 20, 30, etc. Les divisions que l'on obtient de cette manière ne sont pas égales; mais comme elles ne sont pas très-différentes, on les subdivise en 10 parties équidistantes, et l'on admet que le volume d'alcool d'une solution est exprimé en centièmes par le numéro d'ordre du trait affleurant. Ainsi quand il est 25, la liqueur contient 25 centièmes d'alcool

Toutes ces déterminations ont été faites à 15 degrés; mais la question se complique quand la température varie; car les densités changeant et changeant inégalement pour les différents mélanges, la graduation, qui était exacte à 15 degrés, cesse de l'être à d'autres températures. Gay-Lussac a étudié ces variations, les a réduites en Tables, et quand on veut avoir l'ana-

lyse exacte d'un mélange alcoolique, on prend : 1° sa température; 2° le point d'affleurement, et l'on cherche dans un barême calculé la proportion d'alcool. C'est sur ces indications que l'on perçoit les droits de douane proportionnellement à l'alcool contenu dans le liquide.

Un alcoomètre étant difficile à graduer, on a établi d'abord un étalon auquel se rapportent tous les autres. Soit AB cet étalon (*fig.* 152). Si l'on construit un appareil plus petit, et que A′ et B′ soient les affleurements dans l'alcool et l'eau, les divisions intermédiaires devront partager proportionnellement AB et A′B′. Dès lors on construit sur un carton la figure ABO, dont la base AB représente l'alcoomètre étalon; et si l'on veut graduer l'alcoomètre A′B′, on le place parallèlement à AB, en comprenant ses affleurements extrêmes entre AO et BO, et l'on marque les divisions intermédiaires aux points d'intersection des sécantes avec A′B′.

Fig. 152.



Mesure de la capacité d'un vase. — Cette question se présente à chaque pas dans la Physique. Voici comment on peut la résoudre avec précision. On remplit le vase avec de l'eau à zéro, et après l'avoir laissé se réchauffer, on l'équilibre sur la balance avec une tare. Le poids de l'eau est, dans l'air, $\frac{v}{1+\delta_0} - vx$.

On vide le vase, et le remettant dans la balance, on y ajoute, pour rétablir l'équilibre, un poids apparent $(P)(1-\sigma)$, qui est égal à celui de l'eau. L'équation suivante donnera v

$$\frac{v}{1+\delta_0} - vx = (P)(1-\sigma).$$

Si la capacité est égale à 1 litre et que la balance soit sensible à 1 milligramme, l'erreur ne dépasse pas le volume de 1 milligramme d'eau, c'est-à-dire 1 millimètre cube, et n'atteint que la millionième partie de la capacité totale. On augmente encore la sensibilité de la méthode en jaugeant avec du mercure. Si nous désignons par D la densité du mercure, qui est égale à 13,596, l'équation précédente devient

$$vD - vx = (P)(1-\sigma).$$

Dans la plupart des cas, on pourra négliger α à côté de D. On peut remarquer qu'une balance sensible à 1 milligramme apprécie un volume de mercure égal à $\frac{1}{13,596}$ ou 0,07 millimètre cube.

Densités de quelques solides.

Platine écroui	23,000	Chrome	5,900
Platine forgé	19,362	Iode	4,948
Or forgé	19,362	Sélénium	4,320
Or fondu	19,258	Zirconium	4,15
Iridium	18,600	Diamant	3,531 à 3,501
Tungstène	17,600		
Plomb fondu	11,352		
Thallium	11,000	Flint-glass	3,329
Palladium	11,300	Tourmaline	3,155
Rhodium	11,000	Marbre blanc	2,837
Argent fondu	10,474	Émeraude	2,775
Bismuth fondu	9,822	Cristal de roche	2,653
Cuivre en fil	8,878	Aluminium	2,57
Cadmium	8,694	Verre de Saint-Gobain	2,488
Molybdène	8,611	Chaux sulfatée	2,311
Laiton	8,393	Porcelaine de Sèvres	2,145
Arsenic	8,308	Soufre natif	2,033
Nickel	8,279	Albâtre	1,874
Urane	8,100	Phosphore	1,770
Acier	7,816	Magnésium	1,750
Cobalt fondu	7,812	Sodium	0,972
Fer en barre	7,788	Potassium	0,865
Étain fondu	7,291	Bois de hêtre	0,852
Fer fondu	7,207	Orme	0,800
Zinc fondu	6,861	Sapin	0,930
Manganèse	6,850	Lithium	0,59
Antimoine fondu	6,712	Peuplier	0,383
Tellure	6,115	Liége	0,240

Densités de quelques liquides.

Eau à 4 degrés	1,000	Sulfure de carbone	1,293
Aldéhyde	0,805	Acide sulfureux	1,491
Huile d'olive	0,815	Protochlorure de phosphore	1,616
Alcool	0,815	Acide sulfurique	1,841
Esprit-de-bois	0,821	Bichlorure d'étain	2,267
Essence de térébenthine	0,870	Brome	3,187
Eau de mer	1,026	Alcool thallique	3,50
Acide nitrique	1,217	Mercure	13,596

V. — LOIS DES CHALEURS SPÉCIFIQUES DES SOLIDES ET DES LIQUIDES.

En s'échauffant de 1 degré, l'unité de volume d'un corps se dilate de k, son coefficient de dilatation, et absorbe une quantité de chaleur dc, c étant la chaleur spécifique et d la densité.

Cette dilatation est un travail déterminé par une force vive absorbée dcE, E étant l'équivalent mécanique de la chaleur. Il y a nécessairement une relation entre cette cause, l'absorption de la force vive, et cet effet, la dilatation. Examinons donc la chaleur spécifique.

Loi de Dulong. — On a expliqué au Chapitre Ier, page 108, comment on mesure les chaleurs spécifiques des corps. En employant ces procédés, Dulong fut conduit à énoncer la loi suivante :

Le produit AC *de la chaleur spécifique par l'équivalent chimique* A *d'un corps simple quelconque est un nombre constant.*

Le nombre A représentant le poids d'un atome, AC est la *chaleur spécifique atomique*, c'est-à-dire la chaleur nécessaire pour échauffer de 1 degré un atome de tous les corps simples. La loi précédente peut donc se traduire ainsi :

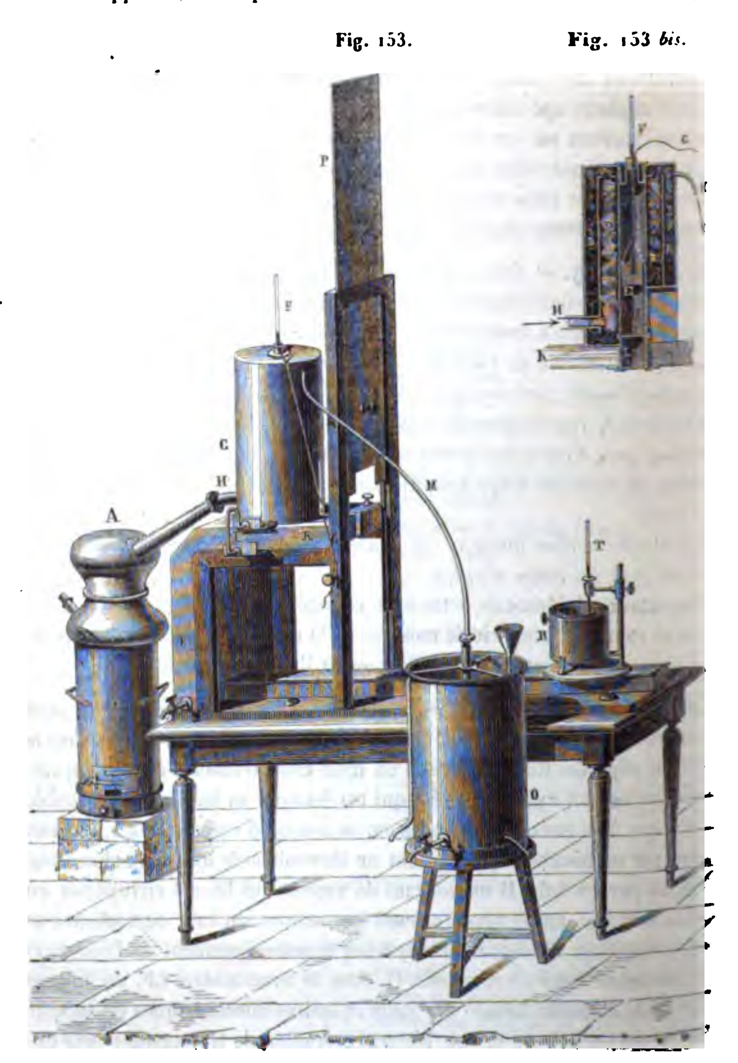
Il faut une même quantité de chaleur pour échauffer également un atome de tous les corps simples.

L'importance évidente de cette loi a engagé M. Regnault à exécuter une longue et remarquable série de mesures de la chaleur spécifique des divers corps simples ou composés. Voici comment il a procédé.

Appareil de M. Regnault. — On échauffe le corps sur lequel on veut opérer, au milieu d'une étuve C (*fig.* 153), dont la *fig.* 153 *bis* représente une coupe séparée. Elle est divisée en trois compartiments concentriques. Le premier est un cylindre LGEF qui est fermé à sa base par un double registre que l'on ouvre ou qu'on ferme au moyen d'une poignée I, et à son sommet par un bouchon qui soutient un thermomètre fixe F. Le deuxième DD reçoit par un tube H un courant de vapeur qui lui est envoyé par un alambic A et qui, après avoir circulé tout autour du tube central, arrive dans un manchon BB destiné à empêcher le refroidissement de l'étuve, et va se condenser dans un serpentin O. Dans le tube central LF, on voit en E une petite corbeille formée par deux cylindres concentriques de toile de laiton, entre lesquels on dépose le corps à étudier; le thermomètre fixe occupe la partie centrale, et la corbeille est soutenue par un fil de soie G qui traverse le bouchon F et vient s'accrocher à un bouton disposé à cet effet.

Pour empêcher la chaleur de l'étuve de se transmettre aux autres parties de l'appareil, elle repose sur une boîte à eau KK doublée de liége et

Fig. 153. Fig. 153 *bis*.



percée d'un canal vertical au-dessous de GF. L'espace compris entre la boîte KK et l'écran P demeure ainsi à la température de l'air. Le calori-

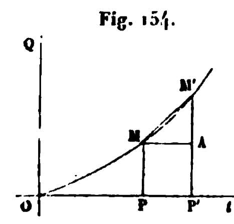
mètre R est mobile sur une coulisse horizontale et peut être poussé sous l'étuve.

Voici maintenant la manière d'opérer. L'écran P étant abaissé et le corps placé dans la corbeille, on fait passer le courant de vapeur. Au bout de deux heures, la température du thermomètre F se fixe vers 99 degrés. On observe alors le thermomètre T du calorimètre, et on amène celui-ci sous l'étuve après avoir levé l'écran P; on décroche le fil G, et on laisse descendre la corbeille avec son contenu dans le calorimètre, qu'on ramène ensuite à sa place primitive. On agite la corbeille dans l'eau par son fil de suspension, et l'observation du réchauffement s'exécute conformément à la méthode générale que nous avons indiquée.

S'il s'agit de liquides, on les enferme dans des tubes bouchés dont on tient compte par le calcul, ou bien on les fait couler de l'étuve, par un tuyau à robinet, dans un réservoir établi dans l'eau du calorimètre.

Résultats généraux. — Nous avons supposé jusqu'à présent que les chaleurs spécifiques des corps étaient constantes. Cela n'est point absolument vrai. Dulong et Petit ont montré depuis longtemps qu'elles croissent avec la température, et M. Regnault a confirmé ce résultat. Si on trace la courbe des quantités de chaleur absorbées par un corps depuis zéro jusqu'à t, elle est convexe vers l'axe des températures (*fig.* 154). Entre M et M', la chaleur spécifique moyenne est représentée par le rapport $\frac{M'A}{P'P}$. Si l'on suppose que les deux points M, M' se rapprochent, la limite de ce rapport sera la tangente trigonométrique de l'angle que fait avec l'axe des t la tangente à la courbe. C'est cette limite que M. Regnault nomme la *chaleur spécifique élémentaire* à la température t.

Fig. 154.



Quand les corps sont solides et à une grande distance de leur point de fusion, cette courbe est peu convexe et l'accroissement de la chaleur spécifique très-lent. Quand on approche du point de fusion, l'accroissement devient très-rapide. Pour les liquides, il est toujours considérable. Ainsi, pour l'alcool, la chaleur spécifique moyenne est 0,596 entre 5 et 10 degrés; elle devient 0,615 entre 15 et 20 degrés. Heureusement, celle de l'eau demeure sensiblement constante et égale à l'unité entre 0 et 200 degrés.

Pour les gaz, elle reste à peu près invariable, quelles que soient la pression et la température.

La chaleur spécifique varie encore avec l'état physique, ainsi que le

montre le tableau suivant. On remarquera que la chaleur spécifique de la glace est environ la moitié de celle de l'eau.

	Chaleur spécifique moyenne à l'état solide.	liquide.	gazeux.
Brome	0,08432	0,11094	0,05518
Eau	0,474	1,000	0,475
	0,504	"	"
Mercure	0,0313	0,0333	"
Phosphore	0,1740	0,2006	"
	0,1887	0,2045	"
Étain	0,05623	0,0637	"
Bismuth	0,0308	0,0363	"
Plomb	0,0314	0,0402	"
Azotate de soude	0,2782	0,413	"
Azotate de potasse	0,23875	0,3318	"

On peut conclure de ces nombres et de quelques autres expériences analogues que la chaleur spécifique varie considérablement avec l'état physique des substances; elle varie aussi pour le charbon suivant ses provenances, pour le soufre et le phosphore suivant qu'ils ont ou non éprouvé leurs modifications allotropiques. Mais, en général, les changements de densité dus au recuit et à la trempe ont assez peu d'influence pour que l'on puisse considérer les chaleurs spécifiques comme caractéristiques des corps eux-mêmes.

Cela étant, M. Regnault a d'abord reconnu l'exactitude de la loi de Dulong et il l'a étendue à tous les corps simples, ainsi que le prouve le tableau suivant, dans lequel AC est compris entre 5,8 et 6,9. Le carbone seul fait exception; mais cette exception même disparaît si on attribue à ce corps un poids atomique double, c'est-à-dire 24.

	Chaleur spécifique C	Poids atomique A	Chaleur atomique AC
Soufre	0,2026	32	6,48
Sélénium	0,0762	79,5	6,06
Tellure	0,0474	129	6,12
Brome solide	0,0843	80	6,75
Iode	0,0541	127	6,87
Phosphore	0,1887	31	5,85
Arsenic	0,0814	75	6,09
Potassium	0,1695	39,1	6,50
Sodium	0,2934	23	6,75
Aluminium	0,2143	27	5,79
Fer	0,5138	56	6,12
Zinc	0,0955	65,2	6,23

		Chaleur spécifique C	Poids atomique A	Chaleur atomique AC
Cadmium		0,0567	112	6,35
Cobalt		0,1068	59	6,30
Nickel		0,1089	59	6,42
Plomb		0,0314	207	6,45
Bismuth		0,0308	210	6,47
Cuivre		0,0951	63,5	6,04
Antimoine		0,0508	122	6,12
Étain		0,0562	118	6,63
Mercure		0,0325	200	6,49
Argent		0,0570	108	6,16
Or		0,0324	197	6,39
Platine		0,0329	197,5	6,49
Iridium		0,0326	198	6,45
Carbone	Diamant	0,1469	12	1,76
	Graphite	0,2019	12	2,42
	Charbon	0,2415	12	2,90
	Charbon	0,2609	12	3,13

Loi de Neumann. — En étudiant divers sels de même formule chimique, de même acide, mais de bases différentes, M. Neumann avait étendu la loi de Dulong; il avait trouvé que les produits des chaleurs spécifiques par les équivalents demeurent constants, mais variables avec les acides. M. Regnault a généralisé la loi de M. Neumann, en examinant des substances très-diverses classées en groupes de même formule, par exemple des oxydes, des sulfures, chlorures, bromures, etc., et enfin des sels.

M. Woestyn a essayé de déduire, par une hypothèse très-simple, la chaleur spécifique d'un composé de celle de ses éléments. Si nous désignons par A, a, a',... les équivalents d'un composé et de ses éléments, et par m, m',... les nombres d'atomes qui entrent en combinaison, la formule chimique du composé sera

$$A = ma + m'a' + \dots.$$

M. Woestyn admet qu'on doit avoir également

$$AC = mac + m'a'c' + \dots,$$

en désignant par C, c, c',... les chaleurs spécifiques des mêmes corps; et comme les produits ac, $a'c'$,... sont sensiblement constants et égaux à 6 pour les corps simples, on doit avoir

$$AC = (m + m' + \dots) \times 6.$$

AC doit donc être égal à autant de fois le nombre 6 qu'il y a d'équivalents dans le composé considéré. Cette loi est sensiblement vérifiée pour

les diverses substances composées qui sont désignées dans le tableau suivant.

Substances.	Chaleur spécifique C	Produit AC
OXYDES, RO.		
Protoxyde de plomb fondu....	0,05089	11,5
Oxyde de mercure	0,05179	11,3
Protoxyde de manganèse......	0,15701	11,2
Oxyde de cuivre	0,14201	11,3
Oxyde de nickel.............	0,15885	11,9
Magnésie....................	0,24394	10,3
Oxyde de zinc	0,12480	10,0
	Moyenne.......	11,0
SULFURES, RS.		
Protosulfure de fer	0,13570	11,7
Sulfure de nickel	0,12813	11,7
Sulfure de cobalt	0,12512	11,4
Sulfure de zinc..............	0,12303	11,9
Sulfure de plomb............	0,5086	12,2
Sulfure de mercure	0,5117	12,0
Sulfure d'étain	0,8365	12,5
	Moyenne.......	11,9
OXYDES, RO^2.		
Acide stannique.............	0,09326	14,0
Acide titanique.............	0,17164	14,0
	Moyenne.......	14,0
OXYDE, R^2O.		
Eau.........................	1,00000	18,0
SULFURES, RS^2.		
Pyrite......................	0,13009	15,4
Bisulfure d'étain............	0,11932	21,7
Sulfure de molybdène	0,12334	19,8
	Moyenne.......	19,0
CHLORURES, R^2Cl^2.		
Chlorure de sodium..........	0,21401	25,1
Chlorure de potassium	0,17295	25,8
Chlorure de mercure.........	0,05205	24,8
Chlorure de mercure.........	0,13827	25,1
Chlorure d'argent...........	0,09109	26,1
	Moyenne.......	25,4

Substances.	Chaleur spécifique C	Produit AC
	BROMURES, R^2Br^2.	
Bromure de potassium.......	0,08191	26,3
Bromure d'argent............	0,07391	27,7
Bromure de sodium..........	0,13842	28,1
	Moyenne.......	27,4
	IODURES, R^2I^2.	
Iodure de potassium.........	0,08191	27,1
Iodure de sodium............	0,08684	26,0
Iodure de mercure...........	0,03949	26,0
Iodure d'argent..............	0,06159	28,9
Iodure de cuivre.............	0,06869	26,0
	Moyenne........	26,8
	SULFATES, SO^3, RO.	
Sulfate de baryte	0,11285	26,3
Sulfate de strontiane.........	0,14279	26,2
Sulfate de plomb	0,08723	26,5
Sulfate de chaux.............	0,19656	26,9
Sulfate de magnésie..........	0,22159	26,6
	Moyenne........	26,5

Signification de la loi de Dulong. — La chaleur atomique multipliée par l'équivalent mécanique de la chaleur 430, exprime une somme de force vive ou un travail mécanique, celui qu'il faut dépenser pour échauffer de 1 degré le poids atomique du corps, c'est-à-dire pour faire trois effets distincts : écarter les molécules, travail intérieur ; vaincre l'effet de la pression atmosphérique, travail extérieur ; et enfin augmenter la vitesse des molécules, c'est-à-dire leur température. La loi de Dulong, celle de Neumann, établissent ce résultat remarquable que ce travail total est constant et le même pour tous les corps simples, et qu'il est proportionnel au nombre des atomes simples réunis dans une molécule composée. Il est impossible de méconnaître l'importance d'une loi si générale et si simple.

VI. — COMMENT SE PROPAGE L'ÉCHAUFFEMENT.

Propagation de la chaleur par conductibilité. — Un boulet rougi, suspendu dans une chambre, se refroidit peu à peu, et, en même temps, il échauffe les objets qui l'entourent. On voit qu'il *rayonne* de la chaleur dans toutes les directions, comme il rayonne de la lumière.

La chaleur se transmet dans le vide, puisqu'elle arrive du soleil, et dans l'air, puisqu'elle traverse l'atmosphère. Elle pénètre les solides et les liquides, par exemple les vitres des serres. Cette transmission se fait sans que les corps s'échauffent. On le démontre en employant une lentille de glace qui concentre les rayons du soleil à son foyer sans se fondre, ou une autre lentille formée par des surfaces de verre et remplie d'eau qu'on renouvelle constamment et qui conserve une température constante, tout en transmettant assez de chaleur pour fondre des métaux.

La chaleur qui se transmet de cette façon se nomme *chaleur rayonnante*. Elle se meut aussi vite que la lumière, puisqu'elle arrive du soleil en même temps. Comme la lumière, elle se propage en ligne droite, elle se réfléchit sur les surfaces polies, et, en général, elle offre avec la lumière de telles analogies, que nous l'étudierons plus fructueusement en Optique.

Mais il y a un autre mode de propagation de la chaleur, c'est sa transmission lente à travers les corps, et qui se fait par exemple le long d'une barre métallique plongée dans un foyer. C'est la communication de proche en proche et de molécule à molécule du mouvement calorifique. Cette transmission des températures se nomme *conductibilité*. Nous en étudierons quelques cas.

Supposons un mur homogène d'épaisseur e dont les deux faces AB CD (*fig.* 155) sont maintenues à des températures a, b. Au bout d'un certain temps, le mur arrive à un état d'équilibre où les températures sont constantes sur chaque plan MN parallèle aux deux faces, et une quantité déterminée de chaleur Q traverse l'unité de surface du mur pendant l'unité de temps. On conçoit qu'elle diminue avec l'épaisseur e et qu'elle augmente avec la différence $a - b$; dès lors, on peut admettre qu'elle est proportionnelle à cette différence, et en raison inverse de l'épaisseur :

Fig. 155.

$$Q = k\frac{a-b}{e}.$$

Si la différence $a - b$ est égale à 1 degré et e égal à l'unité de longueur, on a $Q = k$. Le nombre k est ce qu'on nomme le *coefficient de conductibilité*; c'est la quantité de chaleur qui entre dans le mur ou qui en sort, pendant l'unité de temps, à travers l'unité de surface, quand l'épaisseur est égale à l'unité, et la différence de température des faces extrêmes égale à 1 degré.

Conductibilité extérieure. — Supposons que l'une des faces du mur indéfini soit plongée dans un milieu liquide ou gazeux, maintenu à une température c, et qu'elle ait pris, au bout d'un certain temps, sa température fixe a. Si la différence $(c - a)$ est peu considérable, on peut représenter par $h\,(c - a)$ la quantité de chaleur qui entre dans le mur par l'unité de surface et pendant l'unité de temps, et l'on aura

$$h\,(c - a) = k\,\frac{a - b}{e},$$

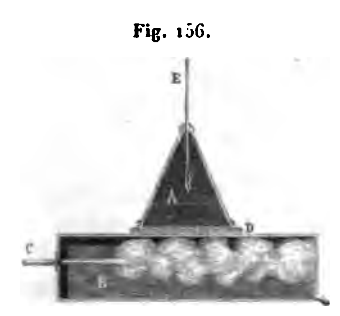
puisque la quantité de chaleur qui traverse le mur est égale à celle qui y entre. De même, si la seconde face est plongée dans un milieu à la température c', la quantité de chaleur qui sort du mur sera représentée par $h'\,(b - c')$, et l'on aura encore

$$h'\,(b - c') = k\,\frac{a - b}{e}.$$

h et h' sont ce qu'on nomme les *coefficients de conductibilité extérieure;* ils expriment la chaleur qui traverse pendant l'unité de temps l'unité de surface de deux milieux en contact quand la différence de leur température est égale à 1 degré.

Mesure des coefficients de conductibilité. — En s'appuyant sur ces formules, on a essayé de mesurer la conductibilité des différents corps. Fourier a imaginé, sous le nom de *thermomètre de contact*, un appareil qui peut servir à apprécier la conductibilité de lames diverses (*fig.* 156). Il se compose d'un entonnoir A dans lequel plonge un thermomètre E; il contient du mercure, et il est fermé à sa base par une peau de chamois. On le place sur une caisse B remplie de vapeur à T degrés, et il est clair que le thermomètre devient stationnaire quand la chaleur gagnée par conductibilité est égale à celle qui est perdue par le rayonnement.

Fig. 156.



On place ensuite sur la caisse et sous l'entonnoir une lame de la substance que l'on veut étudier; alors la chaleur transmise devenant moindre, la température du thermomètre baisse d'autant plus que la conductibilité de la plaque est moindre. Mais cet appareil et tous ceux qui sont fondés sur le même principe sont trop complexes pour servir à la mesure des coefficients de conductibilité. Il

vaut mieux les déterminer par l'observation de la barre indéfinie, comme nous allons le montrer.

Cas d'une barre allongée. — Fourier a trouvé qu'en chaque point d'une barre de longueur indéfinie, chauffée par une extrémité, les excès y de température sur le milieu ambiant sont représentés par la formule

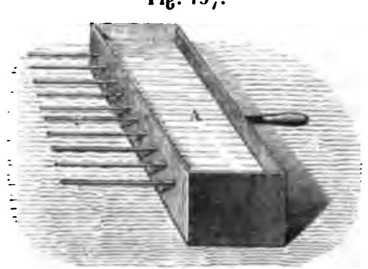
$$y = \mathrm{A}e^{-ax},$$

où x signifie la distance à l'extrémité chauffée.

Par conséquent, si dans une barre infinie les distances au point chauffé croissent en progression arithmétique, les excès de température décroissent en progression géométrique.

On peut réaliser ce cas au moyen de l'appareil d'Ingenhousz (*fig.* 157). Il se compose d'une caisse métallique A que l'on remplit d'eau bouillante et sur laquelle sont implantées diverses tiges métalliques horizontales que l'on couvre de cire. Quand l'équilibre est atteint l'une de leurs extrémités se trouve à 100 degrés et l'autre est à la température de l'atmosphère, si elles sont suffisamment longues. La cire dont elles sont revêtues s'est fondue jusqu'en des points qui sont situés à des distances de la caisse égales à $l, l', l'', \ldots$, et qui ont conséquemment un même excès de température, t. Si l'on considère en particulier deux de ces tiges, et que l'on suppose l'atmosphère à zéro, on aura

Fig. 157.



$$t = 100\,e^{-a'l'}, \quad t = 100\,e^{-al},$$

ce qui exige que

$$\frac{a^2}{a'^2} = \frac{l'^2}{l^2}.$$

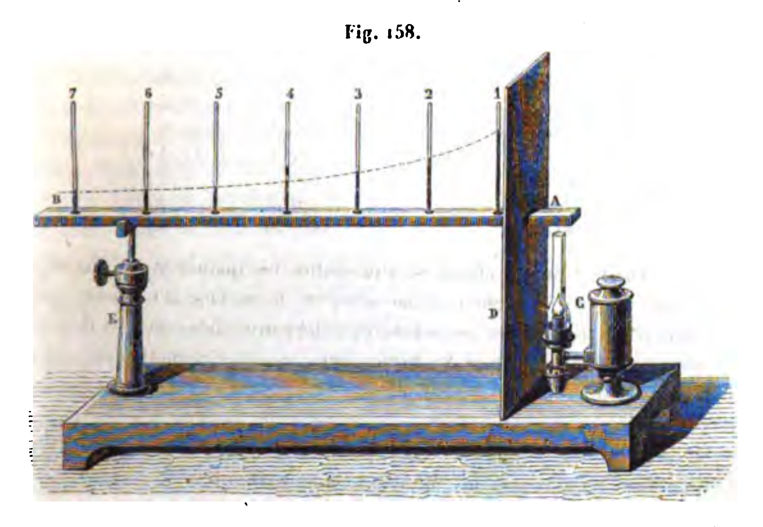
Fourier a trouvé, en outre, qu'en général $a^2 = \frac{hp}{ks}$. Or h est constant, puisque les barres sont couvertes de cire, ce qui leur donne le même coefficient de conductibilité extérieure. De plus elles ont la même section s et le même périmètre p. Donc

$$\frac{k'}{k} = \frac{l'^2}{l^2},$$

ce qui permet de comparer les coefficients de conductibilité des divers métaux.

Les premières expériences de vérification sont dues à Biot; elles ont été exécutées sur des barres métalliques très-longues qui étaient placées horizontalement, se recourbaient à l'une de leurs extrémités et plongeaient dans du plomb fondu que l'on maintenait à une température constante. Des cavités équidistantes percées dans la barre étaient remplies de mercure et recevaient les réservoirs de thermomètres sensibles. Despretz reprit les expériences de Biot et les fit avec plus de soin. L'extrémité A (*fig.* 158)

Fig. 158.



était chauffée par un quinquet C dont la flamme se maintenait constante. La barre traversait ensuite un écran D qui la préservait du rayonnement, et les thermomètres 1, 2, 3,..., qui étaient très-petits, plongeaient dans des trous assez étroits pour ne point altérer sensiblement la continuité de la barre.

Mais dans toutes ces expériences, les barres métalliques étaient trop grosses pour que la température fût exactement la même dans toute l'étendue d'une section normale, et il est certain que les cavités, bien que remplies de mercure, altéraient l'homogénéité des métaux étudiés. M. Langberg a remplacé ces barres par des fils très-fins et a mesuré leurs températures en divers points par une petite pile thermo-électrique, formée de deux éléments dont la soudure était appliquée et pressée sur le contour du fil. Cette pile se reliait avec un galvanomètre, et les températures aux points touchés se calculaient par les déviations de l'aiguille aimantée. La même méthode a été employée ensuite, avec toutes les précautions néces-

saires, par MM. Wiedemann et Frantz. Voici leurs résultats; on les a mis en parallèle avec les conductibilités électriques, qui sont à peu près proportionnelles aux conductibilités calorifiques. Tous ces nombres n'indiquent que les rapports des coefficients de conductibilité, ou les conductibilités relatives.

	CONDUCTIBILITÉ	
	calorifique.	électrique.
Argent	100,0	100,0
Cuivre	73,3	73,6
Or	58,5	53,2
Laiton	21,5	23,6
Zinc	24,0	19,0
Étain	22,6	14,5
Fer	13,0	11,9
Plomb	10,7	8,5
Platine	10,3	8,4
Bismuth	1,9	1,8

Les conductibilités absolues, c'est-à-dire les quantités de chaleur qui traversent en une seconde 1 mètre carré de surface d'un mur épais de 1 millimètre et dont les températures extérieures diffèrent de 1 degré, ont été mesurées d'abord par M. Péclet, ensuite, par des méthodes beaucoup plus précises, par M. Neumann et M. Angström, qui ont trouvé, en moyenne, 101 pour le cuivre, 30 pour le laiton, 31 pour le zinc, 16,3 pour le fer, etc. On obtiendrait à peu près les mêmes chiffres en augmentant d'un tiers les nombres de MM. Wiedemann et Frantz.

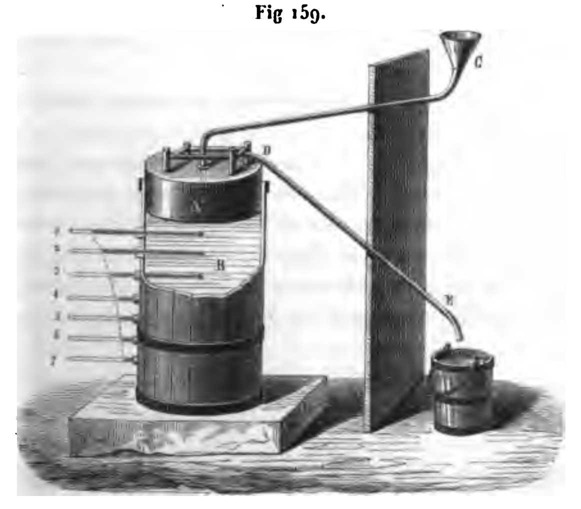
Conductibilité des liquides. — A l'exception du mercure, qui possède une conductibilité comparable à celle des autres métaux, les liquides transmettent très-mal la chaleur, et c'est le plus souvent par des courants intestins qu'ils s'échauffent. Quand, par exemple, on place un vase cylindrique plein d'eau sur un foyer, la partie inférieure du liquide s'échauffe directement, et, devenant en même temps moins dense, elle s'élève dans le vase en transportant la chaleur avec elle. C'est ce que l'on montre en mêlant de la sciure de bois au liquide. On la voit monter contre les parois, redescendre vers l'axe et accuser ainsi l'existence d'un courant liquide continu, ascendant dans les points qui s'échauffent le plus et descendant dans les parties qui ne subissent point l'action directe du feu.

Au contraire, toutes les fois qu'on empêche ces déplacements intérieurs de se produire, on diminue presque jusqu'à l'annuler la transmission calorifique. Si l'on échauffe de l'eau par sa surface supérieure, les couches qui éprouvent l'action du foyer restent au sommet, et l'on ne parvient que très-lentement à augmenter la température des parties sous-jacentes.

Rumford plaça dans deux cylindres de verre identiques des quantités égales d'eau qu'il fit congeler; puis il versa au-dessus 1 kilogramme d'eau à 100 degrés dans le premier vase et 1 kilogramme d'eau à zéro dans le second. Aussitôt les couches qui touchaient à la glace prirent leur maximum de densité, arrivèrent à 4 degrés et s'interposèrent comme un écran mauvais conducteur entre la glace et le liquide supérieur, qui était à 100 degrés dans le premier vase et à zéro dans le second. Au bout d'un temps suffisamment long, on reconnut, par des pesées, que la même quantité de glace avait été fondue dans les deux appareils, et que, par conséquent, la masse d'eau à 100 degrés qui se trouvait dans le premier n'avait point envoyé de chaleur par conductibilité jusqu'à la glace.

Si l'on prend deux ballons égaux, le premier vide, le second bourré de coton cardé, tous deux munis d'un thermomètre placé au centre, et qu'on y verse des poids égaux d'eau bouillante, elle se refroidit rapidement dans le vase où elle est libre et très-lentement dans celui où ses mouvements sont gênés par le coton. Inversement, si tous deux sont à la température de l'atmosphère et qu'on les plonge dans de l'eau bouillante, on voit que le réchauffement, comme précédemment le refroidissement, se fait très-vite dans le premier ballon, et qu'il est à peu près nul dans le second.

Fig 159.



Ces expériences montrent donc que la conductibilité de l'eau est très-faible. Rumford allait même plus loin et niait qu'elle existât. Cependant Nicholson et Pictet, puis Murray, ont fait voir que les liquides échauffés

par le haut transmettent de la chaleur à des thermomètres disposés au-dessous de leur surface, même quand ils sont contenus dans des vases de glace à zéro qui ne peuvent s'échauffer.

Despretz reprit ensuite cette question, et non-seulement il confirma l'existence de cette conductibilité, mais il prouva que les liquides suivent la loi de Fourier. Il fit disposer un tonneau de bois B (*fig.* 159), qui avait $1^m,50$ de hauteur, que l'on remplissait d'eau, et qui était percé d'ouvertures où s'enfonçaient des thermomètres 1, 2,..., 7, dont les réservoirs étaient alignés sur l'axe. Au sommet de ce tonneau se trouvait un vase de cuivre A contenant de l'eau chaude que l'on faisait arriver par un tube CA, et qui s'échappait par un autre conduit DE. Toutes les précautions étaient prises pour éviter des réchauffements par rayonnement.

L'expérience ayant été prolongée pendant trente-six heures, et l'état stationnaire étant atteint depuis longtemps, on trouva que les excès de température des thermomètres suivaient la loi de Fourier : $y = Ae^{-ax}$.

Conductibilité des gaz. — Si habituellement l'eau s'échauffe par des courants, *à fortiori* les gaz doivent éprouver la même action, puisque leur dilatation est considérable et qu'ils sont encore plus mobiles que les liquides. On sait aussi qu'en les emprisonnant dans des étoffes de laine et de soie ou dans des duvets, ou en général dans des corps très-divisés et peu conducteurs, on empêche ou le refroidissement ou le réchauffement. On en conclut que les gaz conduisent très-mal.

Cependant M. Magnus, de Berlin, a étudié leur conductibilité au moyen d'un tube de verre qu'il remplit de gaz et dont il maintenait la partie supérieure à la température de l'eau bouillante, pendant que l'air ambiant restait toujours à 15 degrés. Par cette disposition, on évitait les courants ascendants. Un thermomètre placé dans l'intérieur du tube permettait d'observer l'échauffement du gaz. M. Magnus a constaté ainsi que la conductibilité des gaz est, en général, insensible, sauf pour l'hydrogène, qui conduit la chaleur relativement bien, ce qui le rapproche des métaux.

CHAPITRE III.

PHÉNOMÈNES PRODUITS PAR L'ÉCHAUFFEMENT DES GAZ.

I. — DILATATION DES GAZ.

On retrouve pendant l'échauffement des gaz les mêmes phénomènes que pour les solides et les liquides : ils se dilatent, leur densité diminue et ils absorbent des quantités de chaleur déterminées, variables avec leur nature. Il y a donc à étudier successivement : 1° leur dilatation ; 2° leur densité ; 3° leur chaleur spécifique.

Représentons par v et v' les volumes d'un même poids de gaz à t et t' degrés. aux pressions h et h', et désignons par a le coefficient de dilatation de ce gaz ; $\frac{v}{1+at}$, $\frac{v'}{1+at'}$, exprimeront les volumes ramenés à zéro sous les pressions h, h', et, en vertu de la loi de Mariotte, on aura

$$\frac{vh}{1+at} = \frac{v'h'}{1+at'}.$$

Cette équation exprime que le volume d'un gaz à t degrés, divisé par le binôme de dilatation $(1+at)$ et multiplié par la pression h, est une quantité constante. Elle sera employée à l'avenir dans tous nos calculs, et pour résoudre toutes les questions relatives à la dilatation des gaz, il suffira d'avoir mesuré, comme nous allons le faire, le coefficient de dilatation a.

Les premières expériences exactes sur les gaz sont dues à Gay-Lussac. Il trouva d'abord les dilatations suivantes entre 0 et 100 degrés :

Air.	Oxygène.	Azote.	Hydrogène.
0,375	0,3748	0,3749	0,3752

Bientôt après, craignant avec raison que l'humidité n'eût altéré la dilatation des gaz sur lesquels il avait opéré, il fit une étude spéciale de l'air sec par le procédé suivant.

Un tube thermométrique dont la capacité avait été déterminée comme nous l'avons montré page 103, fut rempli d'air sec en ajustant à son extrémité B (*fig.* 160) un tube C plein de chlorure de calcium, en renversant le tout, et faisant tomber le mercure par un fil de platine P que l'on agitait dans la tige AB. On admettait que l'air qui s'introduisait dans la tige à travers

communique avec des tubes à dessiccation H et, par leur intermédiaire, avec une pompe à main P.

Pour dessécher le ballon, on y fait le vide après avoir porté à l'ébullition l'eau de la chaudière et fermé la branche BC par le robinet inférieur, puis on laisse rentrer l'air à travers les tubes H qui sont remplis de pierre ponce calcinée, imbibée d'acide sulfurique. Cette opération ayant été répétée plusieurs fois, on refroidit le ballon en l'entourant de glace, et l'on ferme la communication qui existait avec les tubes H. On note alors la hauteur barométrique H, qui représente la pression de l'air emprisonné.

Cet air se compose de deux parties : la première est contenue dans le ballon, son volume est V et sa température o degré; la deuxième remplit l'espace compris entre la paroi de la chaudière et le manomètre jusqu'en a. On a jaugé séparément chacun des tubes qui composent cet espace, et comme il est extrêmement petit, n'étant guère que la millième partie de la capacité totale, on peut admettre qu'il est constant et à la température de l'atmosphère; nous désignerons par v son volume ramené à zéro. Dès lors, tout l'air enfermé dans l'appareil aurait à la température de zéro le volume $V + v$, et le produit de ce volume par sa pression serait $(V + v)H$.

Pour passer à la seconde phase de l'expérience, il suffit de porter de nouveau l'eau de la chaudière à l'ébullition. L'air se dilate, le mercure baisse au-dessous de a; mais on le ramène à ce repère en ajoutant du mercure dans la branche ouverte, et on mesure au cathétomètre la différence h des niveaux dans le manomètre; à ce moment, la hauteur barométrique est H', la pression de l'air $H' + h$, et la température du gaz est celle de l'ébullition de l'eau sous la pression H'; elle est donnée par les Tables. Soit T sa valeur; la portion d'air contenue dans le ballon occupe maintenant un volume $V(1 + kT)$; réduit à zéro, il serait $\frac{V(1+kT)}{1+aT}$. Le volume v reste ce qu'il était. En faisant le produit du volume total ramené à zéro par sa pression et en égalant le résultat au produit que l'on a trouvé dans la première phase de l'expérience, on trouve

$$(V + v)H = \left[\frac{V(1+kT)}{1+aT} + v\right](H' + h).$$

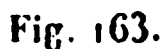
Cette équation donne la valeur de a, et M. Regnault a trouvé ainsi $a = 0,0036645$.

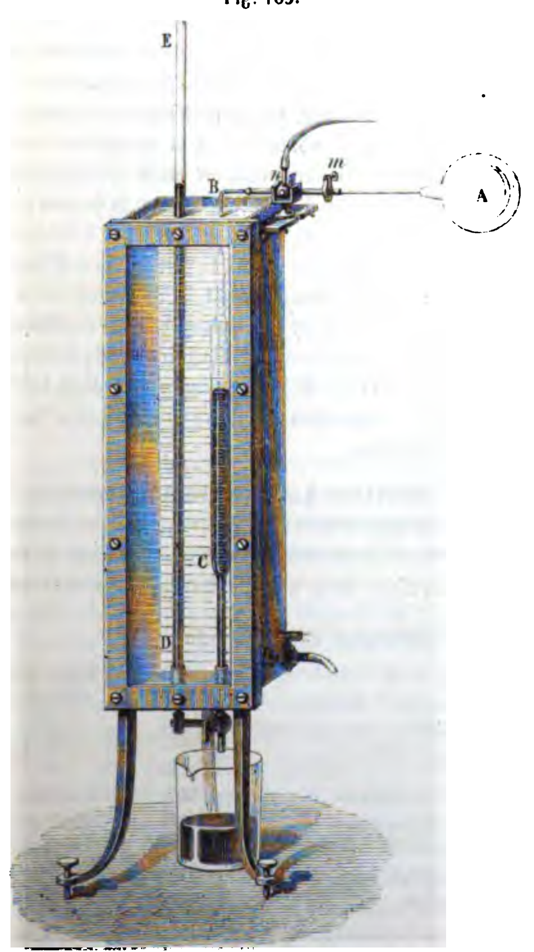
Deuxième méthode. — Dans la méthode précédente, le gaz conserve sensiblement le même volume dans les deux périodes de l'expérience, mais sa pression augmente, et le calcul se fonde sur la loi de Mariotte que l'on suppose exacte. On peut donc dire que le nombre qui vient d'être trouvé

représente la dilatation *à volume constant et à pression variable*. Dans la méthode qui suit, c'est l'inverse que nous ferons.

Nous mesurerons de la même manière les données de l'expérience à zéro, et nous aurons encore le produit constant $(V + v)H$.

Mais quand nous chauffons l'air dans l'eau bouillante, nous laissons le


Fig. 163.



niveau baisser librement au lieu de le ramener au repère constant et nous faisons écouler du mercure jusqu'à maintenir l'égalité de niveau dans les

deux branches du manomètre. L'air conserve ainsi la pression atmosphérique *qui est sensiblement constante*, et son volume s'agrandit de l'espace que le mercure abandonne, espace qu'il est facile de jauger. L'équation précédente devient

$$(V + v)H = \left(V \frac{1 + kT}{1 + aT} + v'\right) H',$$

en appelant v' le volume d'air, ramené à zéro, qui, dans la deuxième période de l'expérience, se trouve compris entre la chaudière et le sommet du mercure. On voit que cette fois tout l'effet de la dilatation est de transporter de l'air dans le manomètre, et que tout l'effort de l'observateur consiste à mesurer avec soin le volume v' et la température de l'air qu'il contient. Pour y arriver plus sûrement, on place le manomètre dans un vase de tôle galvanisée, plein d'eau et fermé sur le devant par une glace (*fig.* 163). M. Regnault a trouvé, par cette méthode, $a = 0{,}0036706$.

Ce résultat exprime la dilatation quand le volume du gaz augmente librement sans que sa pression change; c'est la dilatation vraie *à pression constante et à volume variable*, et l'on voit qu'elle est supérieure à la dilatation trouvée à volume constant qui était 0,0036645. Cette différence tient à l'inexactitude de la loi de Mariotte employée dans le calcul de ces résultats. Elle devient encore plus sensible pour les autres gaz et sous des pressions plus considérables.

Dilatation des différents gaz et à hautes pressions. — M. Regnault fit les mêmes expériences avec divers gaz; il les introduisait dans l'appareil à manomètre, et les observations ne différaient en rien de celles qui ont été faites sur l'air. Nous n'avons donc qu'à résumer les résultats :

Dilatation entre 0 et 100 degrés.

	Sous volume constant.	Sous volume variable.
Hydrogène	0,3667	0,3661
Air	0,3665	0,3670
Azote	0,3668	"
Oxyde de carbone	0,3667	0,3669
Acide carbonique	0,3688	0,3710
Protoxyde d'azote	0,3676	0,3719
Acide sulfureux	0,3845	0,3903
Cyanogène	0,3829	0,3877

Ces résultats confirment qu'il faut distinguer deux coefficients de dilatation, l'un à volume constant, l'autre à volume variable et à pression constante. Pour tous les gaz très-compressibles, le premier est plus p

que le second; mais l'inverse se présente pour l'hydrogène, qui se comprime moins que la loi de Mariotte ne l'indique.

Le tableau précédent met en évidence un fait encore plus important : c'est que les divers gaz se dilatent inégalement et d'autant plus que leur compressibilité est plus grande.

M. Regnault continua ses expériences en employant des manomètres plus élevés, et en enfermant le gaz dans le réservoir sous des pressions plus hautes ou plus basses que l'atmosphère. Voici les résultats qu'il a trouvés.

Dilatation à volume constant, de 0 à 100 degrés.

AIR.		ACIDE CARBONIQUE.	
Pression à zéro.	$100\,a$.	Pression à zéro.	$100\,a$.
110^{mm}	0,3648	758^{mm}	0,3686
760	0,3665	901	0,3694
3656	0,3709	3589	0,3860

Dilatation à pression constante.

HYDROGÈNE.		AIR.		ACIDE CARBONIQUE.	
760^{mm}	0,36613	760^{mm}	0,36706	760^{mm}	0,37099
2545	0,36616	2520	0,36964	2520	0,38455

On voit par ces tableaux que la dilatation de l'air et surtout celle de l'acide carbonique augmentent avec la pression, soit qu'il s'agisse de la dilatation à volume constant ou de la dilatation à pression constante. Pour l'hydrogène, la dilatation à pression constante est sensiblement la même sous des pressions très-différentes.

Ces résultats confirment ce que nous avons dit (p. 77) à propos de la loi de Mariotte. Il semble que les gaz, sous l'influence d'une pression, éprouvent une sorte de condensation anomale qui cesse lorsqu'on les chauffe. Ils ne suivent la loi de Mariotte qu'à une température déterminée; au-dessous, ils s'en éloignent par une compressibilité excessive; au dessus, ils s'en écartent en sens inverse, comme le fait l'hydrogène à la température ordinaire. Cela étant, prenons un volume v de gaz à zéro et à h; si nous le comprimons jusqu'à un volume v', sous une pression h', le rapport $\frac{vh}{v'h'}$ sera plus grand que l'unité. Chauffons maintenant ce gaz, dans chacun de ces deux états, jusqu'à la température t; les coefficients de dilatation sous les pressions h et h' seront a et a', et le rapport précédent deviendra

$$\frac{vh(1+at)}{v'h'(1+a't)};$$

il aura diminué, puisque a' est plus grand que a. Cela veut dire que, si la température augmente de plus en plus, le gaz se rapproche de la loi de Mariotte, l'atteint, et, passé certaine température, s'en écarte en sens inverse.

Toutefois, on peut remarquer que les différences entre les diverses dilatations sont assez faibles, et il sera permis, dans la pratique, d'employer la loi de Mariotte et la formule générale de dilatation, à la condition de remplacer le coefficient a par la valeur qui convient à chaque gaz et aux circonstances dans lesquelles il est placé.

II. — DE LA DENSITÉ DES GAZ.

On appelle ordinairement *densité d'un gaz* le rapport de son poids à celui d'un égal volume d'air pris dans les mêmes circonstances de température et de pression, ou plus exactement, le rapport des poids de volumes égaux de ce gaz et d'air à la température de zéro et sous la pression de 760 millimètres.

Le premier travail précis sur la densité des gaz fut exécuté par Biot et Arago, qui pesaient un ballon, d'abord vide, et ensuite rempli alternativement d'air et du gaz qu'il s'agissait d'étudier. Cette méthode, simple en principe, est fort complexe dans l'exécution, et les résultats qu'elle fournit ne sont pas d'une grande certitude. On doit à M. Regnault une méthode plus précise, que nous allons exposer.

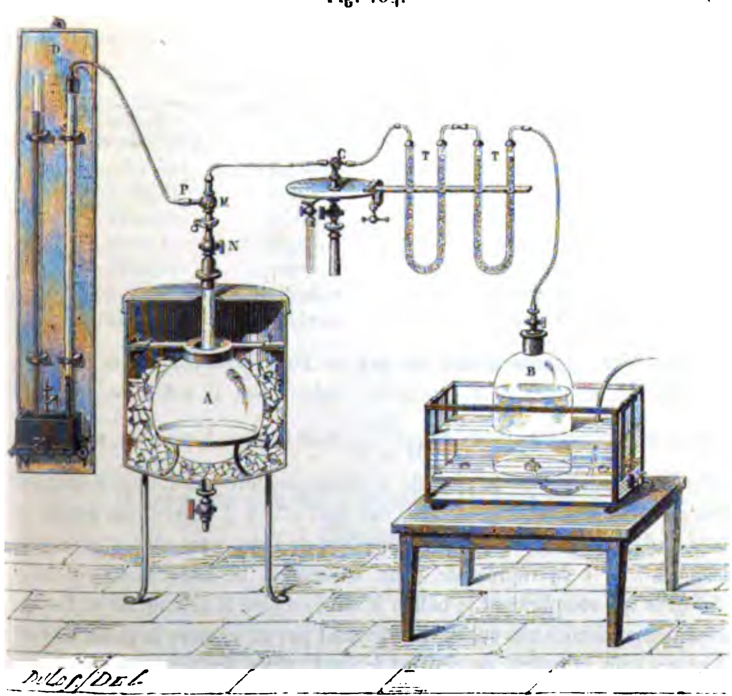
Méthode de M. Regnault. — M. Regnault prend deux ballons de verre de 10 litres environ, portant chacun une armature à robinet identique scellée au minium. Ces ballons ont le même volume extérieur; si l'égalité n'était pas parfaite, on accrocherait au plus petit des deux un tube de verre dont le volume serait égal à leur différence. Il est évident que si l'on suspend ces ballons, fermés, aux deux plateaux d'une balance, ils éprouveront dans l'air des pertes de poids égales et qui se détruiront quelles que soient les circonstances atmosphériques.

On introduit l'un des ballons A (*fig.* 164) dans un vase de zinc plein de glace et muni d'un robinet pour laisser écouler l'eau de fusion; on le fait communiquer, par des robinets à trois voies M et C : 1° avec un baromètre différentiel D; 2° avec une machine pneumatique; 3° avec un réservoir de gaz B par l'intermédiaire des tubes à dessiccation T, T. On enlève et on fait rentrer le gaz à plusieurs reprises; puis, après avoir fait

une dernière fois le vide partiel avec beaucoup de soin, on mesure au cathétomètre la différence h des deux niveaux, et l'on ferme le robinet N. Le ballon contient à ce moment un volume v_0 de gaz à la température de zéro



Fig. 164.



et sous la faible pression h. Après cela, on démonte le raccord M, et le ballon étant enlevé, essuyé et accroché à l'un des plateaux d'une balance, pendant que l'autre est soutenu au second plateau, on établit l'équilibre avec de la grenaille. On replace ensuite ce ballon au milieu de la glace et on ouvre le robinet N. Alors le gaz pénètre dans l'intérieur, la pression totale devient égale à celle de l'atmosphère, que nous désignerons par H, et l'on a introduit ainsi un volume de gaz égal à v_0, à la température de zéro et sous la pression $H - h$. En reportant l'appareil dans la balance, on trouve une augmentation de poids P : c'est le poids du gaz entré dans le ballon.

Si ce même gaz était à zéro sous la pression de 760 millimètres, le poids

deviendrait $P \frac{760}{H-h}$. En répétant l'opération avec l'air, on obtient de même $P' \frac{760}{H'-h'}$ pour le poids du même volume à zéro et à 760, et l'on calcule la densité du gaz en divisant le premier poids par le second.

Densités de quelques gaz.

	DENSITÉS	
	rapportées à l'air.	rapportées à l'hydrogène.
Air	1,00000	14,4384
Oxygène	1,10563	15,9635
Azote	0,97137	14,0250
Hydrogène	0,06926	1,0000
Acide carbonique	1,52901	22,0764
Ammoniaque	0,59669	8,6152
Acide chlorhydrique	1,24740	18,0104

Poids d'un volume donné de gaz. — Pour déduire, des expériences précédentes, le poids de 1 centimètre cube d'air, il suffit de jauger le ballon qui contient le poids $P' \frac{760}{H'-h'}$ d'air à zéro. A cet effet, on le remplit d'eau à zéro et on le pèse de la même manière que lorsqu'il contient des gaz. On trouve le poids de l'eau égal à Σ; à 4 degrés, on aurait eu $\Sigma(1+\delta)$, en désignant par δ la dilatation de l'eau entre zéro et 4 degrés: le poids $\Sigma(1+\delta)$ représente donc le nombre de kilogrammes d'eau à 4 degrés qui rempliraient le ballon à zéro, ou bien le volume de ce ballon, exprimé en décimètres cubes. En divisant par ce nombre le poids de l'air contenu dans le ballon, on obtient *le poids d'un décimètre cube d'air à zéro et à 760 millimètres*, il est égal à $1^{gr},293$. En multipliant ensuite la densité de chaque gaz, rapportée à l'air, par 1,293, on obtient le poids de 1 décimètre cube de ce gaz. M. Regnault a trouvé, de cette manière :

	gr
Air	1,293187
Azote	1,256157
Oxygène	1,429802
Hydrogène	0,089578
Acide carbonique	1,977414

A une température t, sous la pression h, le poids de 1 décimètre cube d'air sec deviendra

$$1^{gr},293187 \frac{1}{1+\alpha t} \frac{h}{760}.$$

Pour un gaz quelconque dont la densité est d, ce poids sera

$$\varpi' = 1^{gr},293187 \frac{hd}{(1+at)760}.$$

Quand on échauffe un gaz, son volume augmente et le poids ϖ' de l'unité de volume diminue proportionnellement à $(1+at)$: en mesurant la diminution de ϖ' on peut calculer le coefficient a.

A cet effet, M. Regnault, après avoir mesuré le poids $\frac{PH}{H-h}$ d'un gaz contenu dans un ballon à zéro, sous la pression H, porte le ballon à T degrés dans la vapeur d'eau. Il ouvre le robinet; une portion du gaz s'échappe, il en reste un poids $\frac{PH}{H-h}\frac{1+kT}{1+aT}$. Soit π la perte de poids. On peut la mesurer par la balance, et on a

$$\pi = \frac{PH}{H-h}\left(1 - \frac{1+kT}{1+aT}\right),$$

d'où l'on tire a. M. Regnault a trouvé

Air............................	0,003665
Acide carbonique...............	0,003712

III. — HYPOTHÈSE SUR LA CONSTITUTION THERMOMÉCANIQUE DES GAZ.

La théorie mécanique de la chaleur est loin d'être complète. Quand il s'agit des solides et des liquides on a admis que la chaleur est un mouvement moléculaire; mais on ne connaît pas la nature de ce mouvement. On ne sait pas davantage quelle portion de chaleur ou de force est employée à écarter ces molécules et à produire ce qu'on nomme le *travail intérieur*. On est plus avancé pour les gaz.

Le travail intérieur est nul. — La propriété qui caractérise les gaz est l'indépendance absolue de leurs molécules. Puisque les pressions individuelles de deux gaz s'ajoutent quand on les introduit dans le même vase, il faut bien que leurs molécules se juxtaposent sans exercer aucune influence réciproque. De cette indépendance découle cette conséquence forcée qu'il n'y a aucun travail intérieur dépensé à rapprocher leurs molécules, ni produit par leur écartement. Cela est démontré par l'expérience de Joule qui nous montre un gaz se dilatant sans se refroidir, à la condition de ne point exécuter de travail extérieur.

Mais, cette indépendance une fois démontrée, on ne sait comment expliquer que cet ensemble de molécules sans liaison compose cependant un tout assez solidaire pour qu'un changement de température ou de pression survenu en un point trouble aussitôt l'équilibre des autres parties. On y réussit cependant par la théorie que Bernoulli proposa dès 1738.

Bernoulli admet que les molécules sont lancées rectilignement avec des vitesses moyennes égales dans tous les sens, se croisant dans toutes les directions, pouvant même se rencontrer et se réfléchir par le choc sans perdre leur quantité de mouvement. On va voir que cette hypothèse suffit pour expliquer les propriétés des gaz.

Pression. — Quand le gaz est dans un vase, les molécules finissent par rencontrer la paroi et la frapper. Ces chocs répétés à des intervalles très-rapprochés sont à tout moment aussi nombreux et aussi intenses dans toutes les directions, et leurs composantes normales agissent sur la paroi comme une pression continue normale. Si ces parois sont immobiles, les molécules s'y réfléchissent en gardant la même vitesse et la pression demeure constante.

Chaleur de compression. — Supposons maintenant que la surface d'un piston plongé dans un tube plein de gaz, soit poussée de dehors en dedans, les molécules qui la frappent pendant ce mouvement reçoivent non-seulement une vitesse normale réfléchie égale à la vitesse incidente, mais encore une addition à cette vitesse, la vitesse du piston; leur force vive est donc augmentée aux dépens du travail qui transfère ce piston. C'est comme une raquette qui reçoit une balle, détruit son mouvement incident et lui rend en sens inverse une vitesse non-seulement égale, mais encore plus grande. De là une augmentation de température, une création de chaleur par une destruction de travail.

Froid de dilatation. — Inversement si le piston, devenu libre, est poussé de dedans en dehors par les chocs des molécules, celles-ci perdent de leur vitesse, de leur température; une quantité de chaleur disparait, équivalente au travail exécuté par le piston.

Loi de Mariotte. — La pression P est égale à la force qu'il faudrait appliquer du dehors au dedans sur une surface égale à l'unité pour détruire d'abord la composante normale u de la vitesse des molécules et pour leur donner ensuite une autre vitesse u normale et contraire, force qui leur imprimerait une vitesse $2u$. On a $P = 2Mu$, en désignant par M la masse de toutes les molécules qui, pendant l'unité de temps, rencontrent la surface considérée. Or M est proportionnel : 1° au nombre des molécules con-

tenues dans l'unité de volume ou à la densité d du gaz ; 2° à la masse m ; 3° à la vitesse u de chacune d'elles. On a donc

$$M = Kdmu$$

et

$$(\alpha) \qquad P = 2Kdmu^2.$$

Cela prouve que pour une même température, c'est-à-dire pour une même valeur de la force vive mu^2, la pression d'un gaz est proportionnelle à sa densité, ou, ce qui revient au même, en raison inverse de son volume. C'est précisément la loi de Mariotte.

Zéro absolu. — L'expérience a montré que les coefficients de dilatation de tous les gaz sont sensiblement égaux entre eux et à 0,00366, ou à $\frac{1}{273}$.

I. On peut écrire, en désignant par P et P_0 les pressions à t et à zéro degrés centigrades,

$$P = P_0\left(1 + \frac{t}{273}\right);$$

et si t devient égal à -273 degrés,

$$P = P_0\left(1 - \frac{273}{273}\right) = 0.$$

II. La pression sera donc nulle à 273 degrés au-dessous de zéro ; et comme elle est, d'après la relation (α), proportionnelle à la force vive des molécules, il faut qu'à cette température les molécules soient en repos et que les gaz ne contiennent plus de chaleur. C'est le *zéro absolu*.

Désignons par θ la température absolue ou comptée à partir de ce zéro. θ sera égal à $273 + t$, et on pourra écrire

$$P = P_0\left(\frac{273 + t}{273}\right) = \frac{P_0\,\theta}{273},$$

et puisque P est égal à $2Kdmu^2$,

$$2Kdmu^2 = \frac{P_0\,\theta}{273}, \quad \theta = \frac{273\,K}{P_0}\,2dmu^2;$$

ce qui veut dire que la température absolue est proportionnelle à la quantité de force vive contenue dans le gaz considéré et qu'elle la mesure.

III. La relation générale qui lie la pression, le volume et la température des gaz est

$$\frac{Pv}{1 + at} = \frac{P'v'}{1 + at'},$$

elle se simplifie en remplaçant t par θ, c'est-à-dire en comptant les températures à partir du zéro absolu :

$$\frac{Pv}{\theta} = \frac{P'v'}{\theta'}.$$

IV. — LE THERMOMÈTRE A AIR.

Après ces études sur la dilatation des divers corps, il convient de revenir sur les appareils employés pour la mesure des températures.

I. On peut faire un thermomètre avec une substance quelconque, et l'on est convenu de mesurer le degré d'échauffement ou la *température* par la dilatation de cette substance. Si elle est égale à δ_{100} entre 0 et 100 degrés, c'est-à-dire entre la température de la glace fondante et celle de l'eau bouillante, on obtient, en divisant δ_{100} par 100, le *coefficient moyen* $k = \frac{\delta_{100}}{100}$, et l'on convient de dire que la température t mesurée par ce thermomètre est

$$1, \ 2, \ 3, \ldots, \ t \text{ degrés}$$

quand sa dilatation δ_t est

$$k, \ 2k, \ 3k, \ldots, \ tk.$$

La température t n'est donc autre chose que le rapport $\frac{\delta_t}{k}$, observé sur une substance donnée.

II. Mais les études précédentes ont montré que la dilatation Δ d'une substance quelconque n'est pas proportionnelle à la température t donnée par le thermomètre adopté, et qu'elle s'exprime en général par la formule

$$\Delta = at + bt^2 + ct^3 + \ldots.$$

Or si on faisait un thermomètre avec cette substance, sa dilatation Δ_{100}, divisée par 100, nous donnerait son coefficient moyen K, et en divisant Δ par K nous trouverions une température

$$T = \frac{\Delta}{K} = \frac{a}{K}t + \frac{b}{K}t^2 + \frac{c}{K}t^3 + \ldots$$

qui ne serait nullement proportionnelle à t.

III. Il s'ensuit que si l'on peut faire des thermomètres avec tous les corps, ils donnent tous des résultats différents. Il faut donc se décider pour l'un ou l'autre ; celui qu'on emploie habituellement est le thermomètre au mercure ; c'est le plus commode, ce n'est pas le meilleur. En effet, la dilata-

ion de ce thermomètre est la différence entre la dilatation du mercure et elle du verre, et comme les différentes sortes de verre se dilatent suivant les lois différentes, les thermomètres ne sont jamais d'accord. C'est ce que M. Regnault a prouvé en comparant une série de thermomètres à mercure faits de différentes sortes de verre. Le tableau suivant contient quelques-unes de ces comparaisons.

Thermomètre à air.	Thermomètre à mercure.		
	Cristal.	Verre ordinaire.	Verre vert.
100°	100,00	100,00	100,00
160	160,52	159,74	160,40
200	201,25	199,70	200,80
240	242,55	239,90	241,60
300	305,72	301,08	"
350	360,50	354,00	"

Il résulte de ces observations que les différents thermomètres à mercure ne sont point rigoureusement comparables entre eux. On va voir que les thermomètres à air possèdent cette qualité essentielle.

Thermomètre à air. — On emploie pour thermomètre à air l'appareil qui a servi à mesurer la dilatation des gaz (p. 159), seulement on remplace souvent le ballon par un long tube que l'on plonge dans l'enceinte dont on veut mesurer la température, comme, par exemple, *fig.* 141, p. 126. On opère exactement de la même manière que lorsqu'il s'agit de mesurer la dilatation, et on arrive à la même formule

$$(V+v)H=\left(V\,\frac{1+kT}{1+aT}+v\right)(H'+h')$$

dans laquelle tout est connu, excepté la température T, et qui sert à la déterminer.

Pour savoir si deux thermomètres à gaz, construits dans des conditions dissemblables, donnent des températures identiques, M. Regnault en préparait deux dans lesquels il faisait varier successivement la pression, la nature du gaz et celle du verre; les nombres trouvés ont toujours été les mêmes. On conçoit que la nature du verre soit ici sans influence, parce que sa dilatation n'est qu'une très-faible partie de celle du gaz, et qu'elle n'en change pas la loi.

Il résulte de là que le thermomètre à air est un instrument parfaitement comparable, et que dans les recherches précises il faudra toujours le préférer. Cependant, comme l'usage du thermomètre à mercure est fort simple, on peut continuer à l'employer, à la condition de le graduer par compa-

raison avec le thermomètre à air et de dresser une Table pour passer de ses indications à celles du thermomètre à air, que l'on adopte finalement.

Le thermomètre à air offre aussi l'avantage de pouvoir être employé à la mesure de températures très-élevées. En remplaçant le ballon de verre par un réservoir en platine, Pouillet a apprécié les températures suivantes :

Rouge naissant	525°
Rouge sombre	700
Cerise	900
Orange foncé	1100
Blanc	1300
Blanc éblouissant	1500

Avantages théoriques. — Outre ses avantages de comparabilité et d'étendue, le thermomètre à air offre encore une qualité théorique qui manque à tous les autres. Si on le gradue à partir de 273 degrés au-dessous de zéro, il exprime les températures absolues, et ses indications mesurent la quantité de chaleur qu'il absorbe ou que les gaz en général absorbent en s'échauffant.

V. — CHALEUR SPÉCIFIQUE DES GAZ.

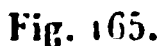
On peut échauffer un gaz soit en lui conservant un volume constant, soit en le laissant se dilater librement, sous une pression invariable. Dans les deux cas, il n'absorbe pas la même quantité de chaleur. Nous nous occuperons d'abord de mesurer la chaleur spécifique à pression constante.

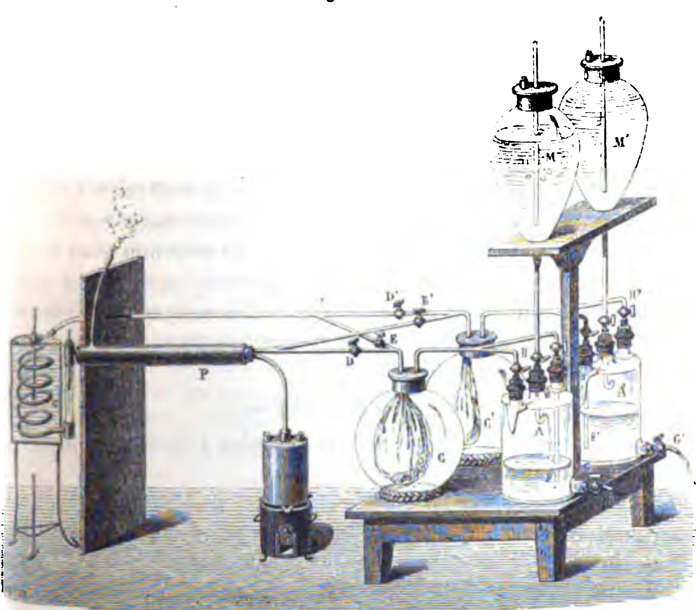
Expériences de Delaroche et Bérard. — Un vase de Mariotte M produit un écoulement d'eau qui se déverse dans le flacon A (*fig.* 165). En pénétrant dans ce flacon, l'eau chasse l'air qui s'y trouve renfermé et l'envoie par un tube H dans un ballon C. Ce ballon contient une vessie remplie du gaz sur lequel on veut opérer, lequel s'écoule par un tube D et passe dans un manchon P qui est échauffé par de la vapeur d'eau.

Au sortir du manchon le gaz a une température de 94 degrés ; il pénètre dans un calorimètre G, c'est-à-dire dans un vase de cuivre plein d'eau, et il circule à travers un serpentin dont la longueur était égale à $1^m,50$. Là il se refroidit et échauffe l'eau.

Il revient par un tube D' dans une vessie vide contenue comme la première dans un ballon C'; il la gonfle, et par le tube F' il chasse l'air du ballon C' dans le flacon A'. Enfin l'eau de ce flacon A' s'écoule par un robinet G' situé au même niveau que l'extrémité F'. On peut voir que

tous ces courants de gaz sont constants, puisqu'ils se font sous l'action d'une pression **MA** qui est toujours la même.


Fig. 165.



Quand tout le gaz contenu dans la première vessie s'est rendu dans la deuxième, on change le sens du mouvement en changeant le sens de tous les robinets des flacons A et A'. Le gaz marche alors dans une direction contraire, mais avec la même pression, et il revient de la vessie C' à la vessie C.

Mais afin de le faire toujours passer par le manchon P qui est destiné à l'échauffer, il y a dans le trajet quatre robinets D, E, D', E'. Dans la deuxième phase de l'expérience, le gaz passe de C' en E' pour aller au manchon et au calorimètre, et il revient par le robinet E dans la vessie C.

Grâce à cette disposition, une petite quantité de gaz peut servir pendant aussi longtemps qu'on le veut. On déterminait le volume qui était mis en circulation par la quantité d'eau qui s'était écoulée, et comme on connaissait la densité du gaz, on pouvait calculer son poids.

Outre la chaleur cédée au calorimètre par le gaz, il lui en arrive par le rayonnement et par la conductibilité du tube qui le joint au manchon.

On diminuait cette cause d'erreur autant que possible en séparant le manchon et le calorimètre par une cloison; enfin on la mesura par une expérience préliminaire qui consistait à échauffer le manchon, à ne point faire passer le gaz, et à observer l'élévation de température du calorimètre. Il est facile de dresser ensuite une Table des augmentations de température qui résultent de cette cause après des temps quelconques.

Delaroche et Bérard ont employé la méthode de compensation de Rumford. Ils commençaient par refroidir le calorimètre jusqu'à 2 degrés au-dessous de la température t de l'enceinte, et ils déterminaient le poids de gaz P qu'il fallait faire circuler pour échauffer l'appareil jusqu'à 2 degrés au-dessus de t. Alors la compensation est sensiblement exacte, et les choses se passent comme si le gaz à la sortie du serpentin avait toujours la même température t (en réalité, sa température est d'abord $t - 2$ degrés, ensuite $t + 2$ degrés). On a dès lors, si l'on désigne par τ l'augmentation de température qui résulte de la conductibilité, et par p le poids du calorimètre réduit en eau,

$$PC(94^\circ - t) = p(4^\circ - \tau).$$

Cette formule permet de trouver C lorsqu'on a déterminé p par des mesures préliminaires.

Le travail de Delaroche et Bérard a été repris par M. Regnault, au moyen d'appareils trop compliqués pour que nous puissions les décrire ici. Mais les nombres qu'il a obtenus sont plus exacts que ceux de ses prédécesseurs. Les voici :

GAZ SIMPLES.

	C	A	AC
Oxygène	0,2175	16	3,52
Azote	0,2438	14	3,36
Hydrogène	3,4090	1	3,41
Chlore	0,1210	35,5	4,30
Brome gazeux	0,0555	80	4,44
Air	0,2374		

GAZ COMPOSÉS.

	C	AC
Bioxyde d'azote	0,2317	4,60
Oxyde de carbone	0,2450	3,25
Acide chlorhydrique	0,1852	3,37
Acide carbonique	0,2169	3,02
Protoxyde d'azote	0,2262	3,34
Vapeur d'eau	0,4803	2,84
Acide sulfureux	0,1544	3,30
Hydrogène sulfuré	0,2432	2,76
Sulfure de carbone	0,1569	2,92

On remarquera que pour que ces divers gaz, soit simples, soit composés, la chaleur spécifique atomique est sensiblement constante, mais qu'elle est à peu près moitié de celle qui a été trouvée pour les solides et pour les liquides.

Dans la théorie thermomécanique cette loi est évidente, la chaleur atomique AC, multipliée par l'équivalent mécanique 430, est le travail qu'il faut dépenser pour élever de 1 degré une molécule de poids A, et puisque les molécules n'ont point de liaison, il n'y a aucune portion de ce travail dépensé à les écarter, tout s'emploie à faire un effort extérieur égal puisque la dilatation est la même, et à imprimer aux molécules une force vive égale, puisque cette force vive est proportionnelle à l'élévation de température. AC doit donc être constant.

Chaleur spécifique à volume constant. — Supposons maintenant que nous échauffions un gaz de 1 degré sans le dilater; toute la chaleur dépensée sera employée à augmenter la vitesse des molécules et la pression qui est proportionnelle à leur force vive. Rien ne servira à faire un travail extérieur. Dans ce cas le gaz absorbera une quantité de chaleur que j'appelle c, qui est la chaleur spécifique à volume constant. Si en le maintenant à la même température, on le laisse se dilater en poussant un piston, il se dilatera de $\frac{\alpha v}{1+\alpha t} = \alpha v_0$, fera un travail $P\alpha v_0$ égal au produit de la pression P par la variation de volume, et absorbera une quantité de chaleur équivalente à ce travail ou $\frac{P\alpha v_0}{E}$, E étant l'équivalent mécanique de la chaleur; en tout il aura, dans cette double opération, absorbé sa chaleur spécifique C à pression constante, et l'on aura

$$C = c + \frac{P\alpha v_0}{E},$$

(1)
$$\frac{C}{c} = 1 + \frac{1}{c}\frac{P\alpha v_0}{E}.$$

$\frac{P\alpha v_0}{E}$ est la chaleur de dilatation; $\frac{1}{c}\frac{P\alpha v_0}{E}$ représente l'abaissement de température que produit cette dilatation, ou l'élévation qui résulterait d'une compression mécanique égale à $P\alpha V_0$. Appelons-la θ, nous aurons

(2)
$$\frac{C}{c} = 1 + \theta.$$

On connaît C; pour trouver c il faudrait pouvoir mesurer θ.

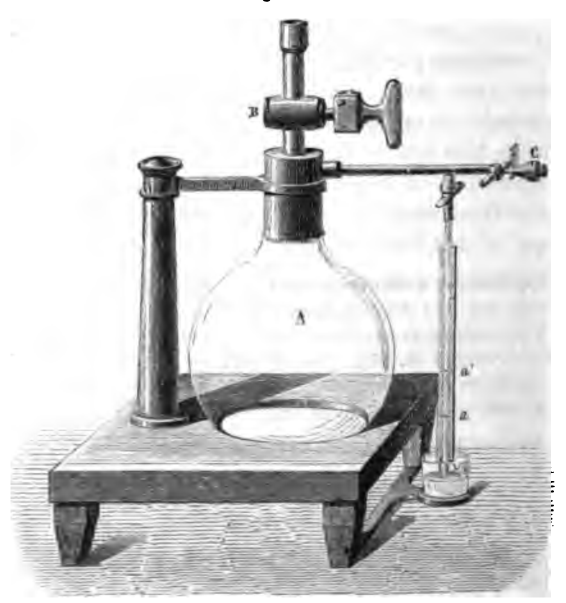
On y est parvenu par une expérience imaginée par Clément et Desormes. Un grand ballon A (*fig.* 166) est muni d'un robinet très-large B qui communique avec l'air extérieur; il porte en outre un tube latéral raccordé avec un manomètre à eau très-sensible a. On commence par faire un vide partiel dans le ballon. Le liquide monte en a' et la pression est $P - h'$.

On ouvrant le robinet pendant un temps très-court, on laisse rentrer l'air

extérieur jusqu'à rétablir la pression atmosphérique; alors le gaz qui était dans le ballon est comprimé, et son volume, qui était égal à l'unité, devient $(1-\delta)$.



Fig. 166.



Sa pression serait $\frac{P-h'}{1-\delta}$ si la température ne s'était point élevée; mais comme elle a augmenté de x, la pression est devenue $\frac{P-h'}{1-\delta}\,\frac{1+\alpha(t+x)}{1+\alpha t}$; elle est égale à celle de l'atmosphère, et l'on a

$$\frac{P-h'}{1-\delta}\,\frac{1+\alpha(t+x)}{1+\alpha t}=P. \tag{3}$$

Peu à peu le ballon revient à la température ambiante t; le niveau remonte en a jusqu'à une hauteur h, et, x devenant égal à zéro, l'équation précédente se réduit à

$$\frac{P-h'}{1-\delta}=P-h. \tag{4}$$

Les équations (3) et (4) permettent de calculer δ et x, c'est-à-dire la compression et l'augmentation de température que l'air intérieur a éprouvées. On trouve

$$\delta=\frac{h'-h}{P-h},\quad x=\frac{1+\alpha t}{\alpha}\,\frac{h}{P-h}.$$

Si la compression δ de l'unité de volume devient égale à $\frac{\alpha}{1+\alpha t}$, l'augmentation de température x devient θ, et l'on a proportionnellement

$$\delta : \frac{\alpha}{1+\alpha t} :: x : \theta,$$

(5) $$\theta = \frac{\alpha x}{1+\alpha t}\frac{1}{\delta} = \frac{h}{h'-h}.$$

Clément et Desormes avaient trouvé $\theta = 0,38$; mais de nouvelles expériences, qui seront rapportées dans la suite, ont donné 0,42 pour l'air, et ont déterminé également la valeur de θ pour divers autres gaz. Comme on connaît C, on a pu calculer c et ensuite E par les formules (2) et (1). Voici les résultats :

	E
Air	426
Oxygène	425
Azote	430
Hydrogène	425
Acide carbonique	410
Protoxyde d'azote	400

On retrouve ici sensiblement la valeur de l'équivalent mécanique de la chaleur par un procédé tout différent des premiers. C'est un sûr garant de l'exactitude de cette théorie.

CHAPITRE IV.

PHÉNOMÈNES OBSERVÉS PENDANT LA FUSION.

I. — DE LA FUSION ET DE LA SOLIDIFICATION.

Fusion. — Lorsqu'on échauffe les corps solides, ils commencent par se dilater; mais, la température augmentant toujours, il arrive un moment où ils passent à l'état liquide, à moins qu'ils ne se décomposent. Ce changement dans leur état physique se produit à des températures extrêmement différentes; pour le mercure, à — 39 degrés, pour l'eau à zéro, pour l'étain à 230 degrés, et le platine ou le fer ne fondent qu'à la température du rouge blanc. Il y a même des substances qui ne se liquéfient point et qu'autrefois on nommait *réfractaires;* mais, à mesure que l'on a pu atteindre des températures plus hautes, on a vu diminuer le nombre des corps réfractaires. Ainsi, dans la flamme du chalumeau à gaz oxygène et hydrogène, ou dans l'arc voltaïque, on a réussi à fondre le platine, le quartz, la chaux, le rubis, l'alumine et même à ramollir le charbon.

Dans la fusion, on constate deux lois : 1° chaque substance commence à se liquéfier à une température déterminée et constante, que l'on nomme son *point de fusion;* 2° la température *demeure invariable* depuis le moment où la fusion commence jusqu'à celui où elle est complète.

Solidification. — Les liquides se solidifient quand on les refroidit; les uns à des températures très-hautes, les autres à des températures moyennes ou basses, et il en est enfin qui n'ont pu être congelés. Mais cette impossibilité tient uniquement à la limitation des moyens de refroidissement que nous possédons. Dès que nous pouvons étendre ces moyens, nous parvenons à solidifier des substances qui avaient jusque-là persisté dans l'état liquide. Ainsi les gaz liquéfiés ont pu être congelés, et Despretz a montré que l'alcool devient assez visqueux pour ne plus couler quand on le plonge dans un mélange d'éther, d'acide carbonique solide et d'oxyde d'azote liquide.

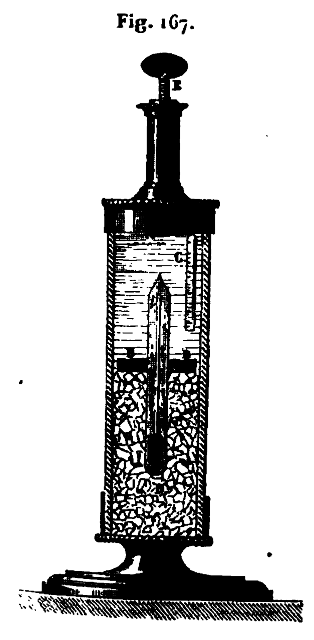
En repassant à l'état solide, les liquides nous offrent trois lois qui correspondent à celles que nous avons trouvées dans la fusion : 1° le point de solidification d'une substance est fixe, il est le même que le point de fusion; 2° la température est invariable pendant tout le temps de la solidification.

Tableau des points de fusion.

Fer martelé anglais	1600°	Cire blanche	69°
Fer doux français	1500	Cire jaune	61
Acier	1400 à 1300	Potassium	58
Fonte grise	1200 à 1100	Phosphore	44
Fonte blanche	1100 à 1050	Suif	33
Or pur	1250	Beurre	33
Argent pur	1000	Glace	0
Bronze	900	Acide hypoazotique	— 9
Antimoine	432	Essence de térébenthine	— 10
Zinc	360	Brome	— 20
Plomb	326	Cyanogène	— 35
Bismuth	262	Mercure	— 39
Étain	230	Acide carbonique	— 58
Camphre	175	Ammoniaque	— 75
Soufre	110	Acide sulfureux	— 76
Iode	107	Acide sulfhydrique	— 86
Sodium	90	Protoxyde d'azote	— 100
Acide stéarique	70		

Variations des points de fusion et de solidification. — Les lois précédentes ne sont point tout à fait absolues, comme on l'avait d'abord admis. On a récemment découvert que des changements considérables dans la pression amènent des variations faibles, mais sensibles, dans les températures de fusion et de solidification. M. W. Thomson a étudié la fusion de la glace au moyen d'un appareil en verre dans lequel on pouvait développer des pressions énergiques (*fig.* 167), et il a trouvé qu'elle a lieu respectivement à — 0°,05 et à — 0°,13 sous les pressions de 8 et 17 atmosphères. M. Mousson est parvenu à faire descendre le point de fusion de la glace encore bien plus bas, au moyen de pressions beaucoup plus fortes.

Fig. 167.



La glace diminue brusquement de volume lorsqu'elle se liquéfie. Mais d'autres substances éprouvent, au contraire, une dilatation subite quand elles se fondent; pour ces mêmes substances, le point de

fusion *monte* avec la pression. C'est ce que M. Bunsen a démontré pour le blanc de baleine et la paraffine, en observant la fusion de ces corps en CD (*fig.* 168) dans un siphon fermé où on développait de fortes pressions par la dilatation d'une colonne de mercure EB que l'on chauffait. Le point de fusion de la paraffine, par exemple, monte de 46°,3 à 49°,9 quand la pression atteint 100 atmosphères.

Fig. 168.

Outre cette cause générale de variation qui affecte également le point de fusion et celui de solidification, il est des circonstances qui font varier le point de solidification seulement. L'eau mise à l'abri de l'air dans un ballon fermé ou sous une couche d'huile peut rester liquide jusqu'à — 12 degrés; mais le moindre choc suffit alors pour déterminer une brusque congélation. Despretz vit le même effet se produire dans des tubes capillaires, où l'eau resta liquide jusqu'à — 20 degrés.

Ce phénomène de la *surfusion* n'est pas particulier à l'eau : on l'a aussi observé avec l'étain, le salpêtre, le soufre, le phosphore, etc. Le phosphore peut rester liquide jusqu'à 22 degrés, si on le fait refroidir dans de l'eau non agitée. Enfin les dissolutions salines sont dans le même cas. Ainsi, une dissolution de sulfate de soude saturée à chaud et renfermée dans un tube effilé, à l'abri du contact de l'air, peut se refroidir sans cristalliser, quoiqu'elle devienne alors plus que saturée; mais elle cristallise aussitôt que l'on casse la pointe du tube. M. Gernez a donné l'explication de ce phénomène; il a démontré que la cristallisation des dissolutions sursaturées est toujours déterminée par des particules solides du même sel qui étaient disséminées dans l'air qu'on laisse rentrer ou qui sont apportées par les corps que l'on plonge dans ces dissolutions.

Changements de volume pendant la fusion. — En dehors de la dilatation que tous les corps éprouvent aussi bien à l'état solide qu'à l'état liquide, leur volume, et par conséquent leur densité, subit encore un changement brusque au moment du passage de l'un de ces états à l'autre. Ainsi l'eau se dilate en se congelant, puisqu'elle fait alors éclater les vases fermés qu'elle remplit complétement. La fonte de fer, l'antimoine, le bismuth sont dans le même cas; la plupart des sels se dilatent aussi en cristallisant. Mais le mercure, le phosphore, le soufre, la stéarine, la paraffine, etc., diminuent de volume en se solidifiant, et ce dernier cas est le plus habituel.

M. Erman a fait une étude spéciale de la marche du phénomène dans l'eau, le phosphore et l'alliage formé de 1 partie d'étain, 1 de plomb et 2 de bismuth. Il a trouvé que la glace, prise au-dessous de zéro, se dilate d'abord rapidement (*fig.* 169); lorsqu'elle approche de zéro, elle commence à se contracter, et cette contraction très-rapide se continue après la liquéfaction jusqu'au maximum de densité, en D, qui a lieu à 4 degrés; ensuite, la dilatation recommence et se régularise (*fig.* 169). Le phosphore se dilate avant et après la fusion, mais son volume augmente, en outre, brusquement au moment où celle-ci a lieu (*fig.* 170). L'alliage fusible se dilate d'abord uniformément jusqu'à 44 degrés, puis il diminue de volume et atteint un minimum à 69 degrés, après quoi il se dilate rapidement jusqu'à 100 de-

Fig. 169.

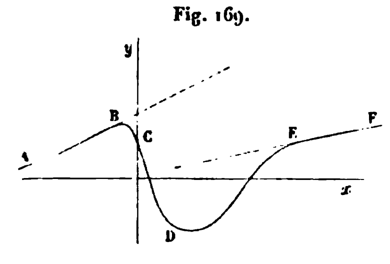
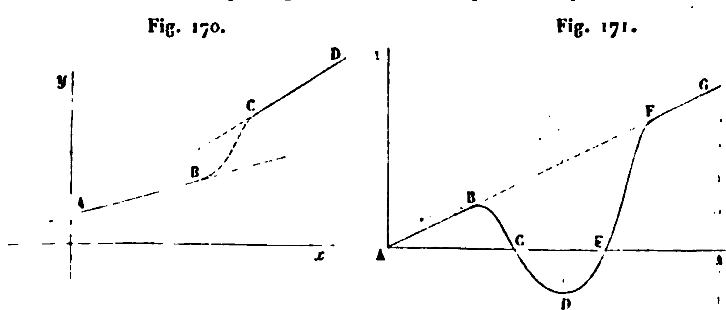


Fig. 170.

Fig. 171.



grés, en passant par le point de fusion qui est à 94 degrés; à partir de 100 degrés, la dilatation suit la même loi qu'au-dessous de 44 degrés (*fig.* 171). Ce corps se dilate donc de la même manière à l'état solide et à l'état liquide, sauf une anomalie qui a lieu dans le voisinage du point de fusion, et son maximum de densité est à 69 degrés.

Fusion des alliages. — Les alliages formés de plusieurs métaux se liquéfient *complétement* à une température qui est fixe, et généralement plus basse que les points de fusion des éléments qui les composent. Voici les points de fusion de quelques alliages définis :

Sn^5Pb	194°	Sn^3Bi	200°
Sn^3Pb	187	$Sn\,Bi$	141
$Sn\,Pb$	241	$Pb^2Sn^2Bi^3$	100
$Sn\,Pb^3$	289	$Pb\,Sn\,Bi^4$	94

Dans la plupart des cas, la fusion complète est précédée d'un ramollissement, ce qu'on explique en admettant que l'alliage se partage en deux autres de fusibilité différente, et dont l'un se liquéfie pendant que l'autre reste solide. Quand ce phénomène est très-prononcé, on l'appelle *liquation*.

En refroidissant un alliage complétement fondu, on observe le phénomène inverse, c'est-à-dire une solidification partielle qui précède la totale. Rudberg a trouvé qu'avec deux métaux, tels que le plomb et l'étain par exemple, le moins élevé des deux points de fusion demeure invariable et égal à 187, pendant que l'autre varie avec la proportion des métaux alliés; les deux points de fusion coïncident pour l'alliage Sn^3Pb, le seul qui ne se dédouble pas, et que Rudberg appelle pour cette raison *alliage chimique*.

Allotropie. — Trois substances simples, le soufre, le sélénium et le phosphore, ont offert aux chimistes des particularités très-remarquables.

Chauffé jusqu'à 400 degrés, le soufre devient visqueux, et si on le coule à cet état dans l'eau froide, il se maintient en filaments élastiques et verdâtres : c'est le soufre mou. De son côté, le sélénium, quand on l'a maintenu fondu pendant longtemps à 220 degrés et qu'on le laisse refroidir lentement, prend également vers 50 degrés un nouvel état solide amorphe. Ainsi, préparés par une manipulation qui est très-analogue, ces deux corps acquièrent des propriétés toutes nouvelles, et il faut chercher à se rendre compte des causes qui modifient alors leurs caractères ordinaires. Or, si on les porte tous les deux progressivement jusqu'à 100 degrés environ, il arrive un moment où ils s'échauffent brusquement et spontanément : le soufre mou jusqu'à 110 degrés et le sélénium amorphe jusqu'à 140. Après cela, ils ont repris leurs propriétés ordinaires. Il est donc évident qu'ils avaient conservé de la chaleur et qu'en la perdant ils perdent également les propriétés nouvelles qu'ils avaient acquises.

Le phosphore, chauffé pendant huit ou dix jours vers 250 degrés, prend une couleur de carmin et devient ce que l'on nomme le *phosphore rouge*. En cet état il est insoluble dans l'alcool et l'éther; il ne prend feu qu'à une température très-haute; il cesse d'être un poison et ne ressemble plus en rien au phosphore ordinaire; mais il revient à son état premier quand on le chauffe à 260 degrés, et probablement alors il abandonne de la chaleur comme le font les corps précédents.

Regel. — On comprend sous ce nom une série de faits dont la première découverte est due à Faraday, et qui font ressembler la glace à un corps visqueux. Ainsi, deux morceaux de glace fondante mis en contact gèlent aussitôt ensemble, même au sein de l'eau chaude. M. Tyndall rattache à ces phénomènes le moulage de la glace, qu'il a obtenu par

le procédé suivant. Un morceau de glace est fortement comprimé entre deux pièces de bois qui laissent entre elles une cavité lenticulaire. La glace se brise alors en mille morceaux, mais ces fragments se soudent entre eux et la masse se transforme en une lentille transparente et compacte. Par des opérations analogues, on peut courber en anneau une barre de glace rectiligne, comme si la glace était une substance plastique. Le mouvement des glaciers et la facilité avec laquelle ils se moulent dans les vallées qu'ils traversent, sont des faits du même ordre. On les explique en admettant que l'eau contenue entre deux parois de glace se congèle plus facilement que lorsqu'elle mouille une surface libre.

II. — LA FUSION EST UN TRAVAIL. — SON ÉQUIVALENT EN CHALEUR.

Toute fusion est accompagnée d'un phénomène important : d'une destruction de chaleur, et toute solidification, d'une production de chaleur.

Supposons en effet qu'on tienne sur un foyer une masse considérable de glace en l'agitant rapidement. A partir du moment où elle commencera à fondre, jusqu'à celui où elle sera liquéfiée tout entière, elle restera à la température de zéro; elle absorbera donc en changeant d'état toute la chaleur que lui cède le foyer. On peut mesurer cette chaleur comme il suit : prendre 1 kilogramme d'eau à 80 degrés et y jeter 1 kilogramme de glace; celui-ci fond tout entier et ramène l'eau à zéro; il a donc absorbé toute la chaleur que l'eau a perdue, c'est-à-dire 80 calories.

Réciproquement l'eau perd 80 calories en se solidifiant. Quand en effet on a réussi à l'amener à l'état liquide à 10 ou 12 degrés au-dessous de zéro et qu'on y projette une aiguille de glace, elle se solidifie en partie, et sa température remonte à zéro. De même le tube qui contient une dissolution sursaturée de sulfate de soude s'échauffe beaucoup quand on détermine tout à coup la cristallisation du sel. En général tout corps liquide garde la même température pendant tout le temps de sa solidification dans une enceinte refroidie au-dessous du point de fusion, et, pendant que dure sa solidification, il rayonne et perd une grande quantité de chaleur sans que sa température baisse.

L'ancienne théorie de la chaleur éprouvant une impossibilité radicale à expliquer ce phénomène, s'était contentée de le constater et de lui donner un nom qu'on doit aujourd'hui abandonner : on disait que pendant la fusion la chaleur se dissimulait et devenait *latente*. La théorie thermodynamique prévoit et explique cette absorption de la manière la plus simple.

A l'état solide, les molécules sont adhérentes par l'effet d'une force attractive, la cohésion. Pour détruire cette cohésion, il faut évidemment le travail d'une force opposée, travail qu'on peut représenter par $430 \times \lambda$. On peut faire partiellement ce travail en pulvérisant la substance dans un mortier; on le fait totalement en fournissant à la matière par unité de poids une quantité de chaleur λ, laquelle sera l'équivalent thermique de la cohésion détruite. C'est cette chaleur qui disparaît pendant la fusion et qu'on avait nommée *chaleur latente*. Le phénomène toutefois n'est pas simple. Non-seulement la cohésion est détruite, mais les molécules sont écartées ou rapprochées, et il y a en outre un travail extérieur. Par exemple, la glace diminue de volume pendant la fusion. Il suit de là que si on la comprime on fait par cette pression une partie de l'effet que produit la chaleur pendant la fusion, d'où il suit que le point de fusion baisse. Le contraire a lieu pour la paraffine : son volume augmente par la fusion et diminue par la pression, la pression agit à l'opposé de la chaleur, elle retarde le point de fusion.

Mesure de la chaleur de fusion. — On appelle *chaleur de fusion* le nombre de calories que l'unité de poids d'un corps absorbe quand il se fond, ou dégage quand il se solidifie, sans que sa température change. On la mesure par la méthode des mélanges, au moyen de l'appareil déjà décrit p. 109.

Si le corps est liquide à la température ordinaire, on le refroidit, on le prend congelé à t degrés et on le plonge dans de l'eau chauffée à une température T. Il se réchauffe d'abord jusqu'à son point de fusion $\mathfrak{T}$ et absorbe une quantité de chaleur $pc(\mathfrak{T} - t)$; puis, se fondant, il prend $p\lambda$; devenu liquide, il parvient avec l'eau à une température finale θ, et, sa chaleur spécifique étant alors c', il gagne $pc'(\theta - \mathfrak{T})$. La somme de ces gains est égale à la chaleur perdue par l'eau, ou à $P(T - \theta)$ et on a

$$pc(\mathfrak{T} - t) + p\lambda + pc'(\theta - \mathfrak{T}) = P(T - \theta).$$

Cette formule permet de calculer λ lorsqu'on connaît les chaleurs spécifiques c et c' à l'état solide et à l'état liquide. On fait, dans ces expériences, les mêmes corrections que pour la mesure des chaleurs spécifiques.

S'il s'agit de l'eau, on projette dans le calorimètre un morceau de glace bien pure et essuyée. Son poids p se détermine en pesant l'augmentation qu'a subie celui du calorimètre. Dans ce cas $\mathfrak{T} = t = 0$, $c' = 1$, et la formule devient

$$p\lambda + p\theta = P(T - \theta).$$

MM. de la Provostaye et Desains ont trouvé de cette manière, pour la chaleur de fusion de la glace, le nombre 79,25.

Pour mesurer la chaleur de fusion des corps qui sont solides à la tempé-

rature ordinaire, on commence par les liquéfier et même à les porter à une température t notablement supérieure à leur point de fusion; puis on les plonge dans un calorimètre dont on suit le réchauffement jusqu'à ce qu'il atteigne la température maximum finale θ. Alors ce calorimètre gagne $P(\theta - T)$, et le corps perd : 1° $pc'(t - \mathfrak{T})$ en se refroidissant, à l'état liquide, jusqu'à son point de solidification $\mathfrak{T}$; 2° la chaleur de fusion $p\lambda$ en se solidifiant; 3° $pc(\mathfrak{T} - \theta)$ en se refroidissant, à l'état solide, de $\mathfrak{T}$ à θ. On a donc

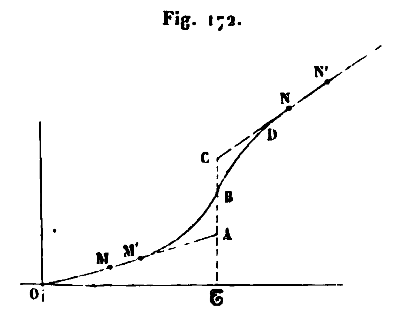
$$pc'(t - \mathfrak{T}) + p\lambda + pc(\mathfrak{T} - \theta) = P(\theta - T).$$

M. Person a obtenu par cette méthode les résultats suivants :

	POINT de fusion.	CHALEUR SPÉCIFIQUE.		CHALEUR de fusion.
	o	c	c'	
Eau	0,0	0,504	1,000	79,25
Phosphore	44,2	0,1788	0,2045	5,034
Soufre	115,2	0,2026	0,234	9,368
Étain	237,7	0,0562	0,0637	14,252
Bismuth	266,8	0,0308	0,0363	12,640
Plomb	326,2	0,0314	0,0402	5,369
Zinc	415,3	0,0955	»	28,13
Argent	»	0,05701	»	21,07
Mercure	»	»	0,03332	2,83

Nous avons supposé jusqu'ici que les corps éprouvaient une fusion brusque et absorbaient brusquement leur chaleur de fusion. Dans cette hypothèse on peut représenter la chaleur qu'ils absorbent par les ordonnées des deux droites OA et CN (*fig.* 172), raccordées par la ligne verticale AC qui exprime la chaleur de fusion. Mais il y a un grand nombre de corps, comme la cire, le potassium, le verre, etc., qui commencent par se ramollir avant de devenir liquides. Alors la fusion est graduelle et l'absorption de la chaleur l'est également; la courbe brisée devient continue et se représente par OMBDN. La chaleur de fusion AC n'est plus alors qu'une donnée purement fictive, mais les chaleurs spécifiques varient considérablement aux environs du terme de fusion $\mathfrak{T}$.

Fig. 172.



CHAPITRE V.

PHÉNOMÈNES OFFERTS PAR LA VAPORISATION.

I. — DES VAPEURS DANS LE VIDE.

Je suppose qu'on ait plongé dans une cuvette pleine de mercure deux baromètres bien purgés d'air, et qu'on introduise dans les deux une petite quantité d'eau au moyen d'une pipette recourbée. On voit aussitôt cette eau bouillir et le mercure baisser progressivement dans le tube. Si le baromètre est terminé par un large ballon, l'ébullition dure très-longtemps et la dépression se fait très-lentement.

On conclut de là que l'eau se transforme en un gaz qui a la même composition qu'elle et qu'on nomme *vapeur*, et que ce gaz exerce une pression sur le mercure. Il y a deux cas à distinguer : celui où on a mis peu de liquide et qu'il se vaporise en entier, et celui où on en a employé un excès qui reste.

Vapeurs non saturées. — Soit CAD (*fig.* 173) un tube rempli de vapeur et disposé de façon qu'on puisse progressivement le soulever ou l'abaisser et mesurer la dépression du mercure. On reconnaîtra qu'en faisant varier le volume occupé par la vapeur, on fait aussi varier sa pression, et que dans chaque cas le produit de ce volume par cette pression est sensiblement constant, c'est-à-dire que la loi de Mariotte s'applique aux vapeurs comme elle s'applique aux gaz et avec les mêmes restrictions.

Fig. 173.

Si l'on voulait ensuite mesurer la dilatation de ces vapeurs, on pourrait se servir du même tube, qu'on entourerait d'un manchon plein d'eau plus ou moins chaude ; on terminerait sa partie supérieure par un vaste réservoir, et on l'emplirait à zéro de vapeur d'éther

par exemple. Après l'avoir échauffé, on soulèverait le tube jusqu'à reproduire la pression primitive, et l'augmentation de volume permettrait de calculer la dilatation. On trouverait ainsi que le coefficient de cette dilatation change très-peu avec la nature et la pression des vapeurs, et qu'il est compris entre 0,00366 et 0,00380 comme pour les gaz.

Dès lors on peut admettre que les vapeurs qui ne sont pas mouillées par un excès de liquide sont caractérisées par les mêmes propriétés physiques que les gaz, et que la formule générale

$$\frac{vh}{1+at} = \frac{v'h'}{1+at'}$$

s'applique à cette nouvelle classe de corps comme elle s'appliquait aux gaz, avec le même degré d'exactitude.

Vapeurs saturées. — Mais les choses ne se passent plus ainsi quand on a mis dans le baromètre un excès de liquide. On voit dans ce cas l'ébullition de ce liquide se ralentir, puis cesser, et la dépression mercurielle atteindre une limite fixe.

Si dans ce nouveau cas on soulève ou qu'on abaisse le tube C, le niveau du mercure reste constamment à la même hauteur AB, c'est-à-dire que la pression de la vapeur ne change pas. Cela tient à ce qu'une portion de liquide se vaporise aussitôt que l'espace superposé s'agrandit, et qu'une partie de la vapeur se condense si cet espace décroît. Ainsi, les vapeurs se forment rapidement dans le vide, et elles y prennent une force élastique indépendante du volume qu'elles occupent et qui est invariable quand la température est fixe.

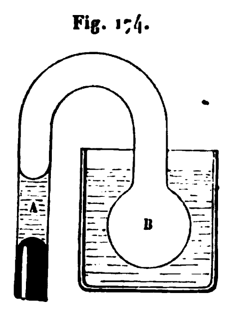
On dit que cette force ou tension est *maximum*, que l'espace est *saturé* et que la vapeur est à l'état de *saturation*.

Cette tension maximum est *d'autant plus grande que la température est plus élevée,* et puisqu'elle est indépendante du volume, il faut conclure que la quantité pondérable de vapeur nécessaire pour saturer un espace donné est proportionnelle à cet espace et croît avec la température. On augmentera cette quantité en augmentant ce volume et cette température, soit séparément, soit à la fois, et, inversement, on a deux moyens pour amener à l'état de saturation une vapeur non mouillée, ou pour ramener partiellement une vapeur saturée à l'état liquide : l'un est de diminuer son volume, l'autre est d'abaisser sa température.

Paroi froide. — Il n'est même pas nécessaire de refroidir tout l'espace occupé par une vapeur pour la condenser partiellement : il suffit d'abaisser la température d'une paroi. Admettons, par exemple, que le baro-

mètre à vapeur soit terminé par une sphère B plongée dans l'eau froide à t degrés (*fig.* 174) et que le liquide placé en A soit à une température constante T supérieure à t. La vapeur se formera avec une tension maximum f_T, se répandra jusqu'en B, s'y refroidira et s'y condensera partiellement, puisqu'elle ne peut exister à t degrés qu'avec une force élastique moindre que f_T. Après cette condensation, la pression ayant diminué en A et étant plus petite que f_T, une nouvelle quantité de vapeur se formera, qui bientôt se liquéfiera à son tour en B. Il y aura conséquemment un équilibre mobile et une distillation de A vers B, jusqu'au moment où tout le liquide en excès aura été vaporisé en A, condensé en B et où la force élastique sera f_t correspondante à la température des parois refroidies. Cette conséquence, dont on a fait des applications importantes, est connue sous le nom de *propriété des parois froides*.

Fig. 174.



On comprend aisément ces phénomènes. Les molécules de l'eau et de tous les liquides se repoussent. Dans le vide elles se séparent et forment un gaz dont la pression s'exerce sur le liquide et augmente progressivement. L'équilibre s'établit, et la force répulsive des molécules est mesurée par la tension qui s'est produite dans le vase. Si l'on chauffe un peu, la répulsion croît, l'ébullition recommence et la tension augmente; en refroidissant, la répulsion diminue, une portion de la vapeur se condense. Si au lieu de laisser la vapeur se former spontanément on la remplaçait par un gaz ayant même tension, rien ne serait changé, et la limite d'ébullition serait atteinte *quand la pression de l'enceinte serait égale à la tension du liquide*. Il faut maintenant mesurer cette tension à diverses températures.

II. — MESURE DE LA TENSION MAXIMUM DES VAPEURS.

Puisque la vapeur d'eau atteint des tensions maxima qui croissent avec la température, il faut chercher expérimentalement la loi de progression qu'elles suivent. Outre l'intérêt scientifique qui s'attache à cette question, elle offre encore celui d'une haute utilité pratique, puisque la vapeur d'eau est devenue le moteur le plus usuel.

I. *Entre zéro et* 100 *degrés.* — C'est Dalton qui a découvert les propriétés des vapeurs et mesuré le premier la tension de la vapeur d'eau, à

l'aide de l'appareil représenté *fig.* 175. Dans une marmite de fonte remplie de mercure plongent un baromètre *b* et un second tube *a* qui contient un peu d'eau pour fournir la vapeur; tous deux sont maintenus verticalement et entourés d'un manchon de verre plein d'eau qui s'appuie sur le fond de

Fig. 176.

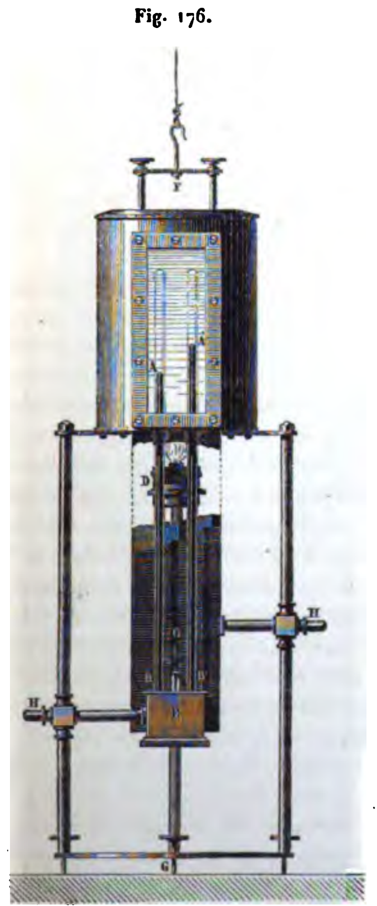


Fig. 175.

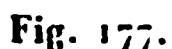
la marmite, de sorte que l'eau est supportée par le mercure qu'elle déprime un peu à l'intérieur.

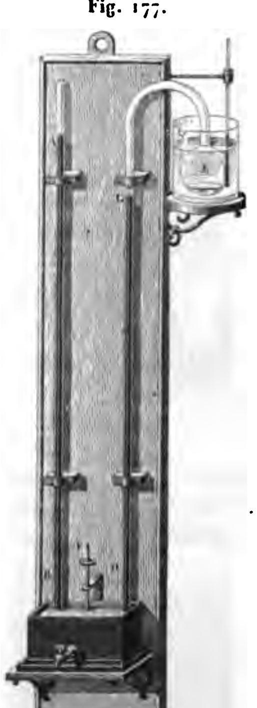
En plaçant l'appareil tout entier sur un fourneau allumé, on échauffait à la fois le mercure et l'eau et, par suite, les deux tubes *a* et *b*. On rendait la température constante dans toute la masse en la remuant avec un agitateur DD'EE'.

La température était donnée par plusieurs thermomètres échelonnés

dans toute la hauteur de l'appareil, et dont on prenait la moyenne. Pour obtenir la pression, on mesurait la différence de hauteur h des deux baromètres au moyen d'une règle divisée contre laquelle ils étaient appuyés. Mais, comme le mercure de ces baromètres est à une température t, il fallait ramener la dépression observée à zéro, c'est-à-dire diviser h par $(1 + mt)$, m étant le coefficient de dilatation absolue du mercure. On faisait ces observations en élevant progressivement la température jusqu'au voisinage de 100 degrés. A ce moment, la tension et la dépression h approchant de 760 millimètres, les mesures ne pouvaient plus se continuer.

M. Regnault a reconnu que cette méthode ne peut s'appliquer qu'à des températures peu élevées, il a remplacé l'appareil de Dalton par celui de la *fig.* 176 qui permet de viser les sommets A et A' des deux colonnes de mercure au cathétomètre à travers une fenêtre de glace.


Fig. 177.



II. *Au-dessous de zéro.* — La méthode de Dalton, qui suffit pour les températures comprises entre 0 et 50 degrés, n'aurait pu servir au-dessous de zéro sans une heureuse modification introduite par Gay-Lussac. Dans son appareil (*fig.* 177), il y a encore deux baromètres voisins AB et CD; le second CD, qui contient l'eau, se recourbe à son sommet, se termine par un ballon E et plonge dans un mélange réfrigérant. La tension définitive qui s'établit dans ce tube étant celle qui correspond à la température de ce mélange réfrigérant, l'appareil est dans les mêmes conditions que si la chambre à vapeur tout entière était refroidie; et comme les deux tubes sont placés dans l'air, on mesure aisément au cathétomètre la différence des niveaux.

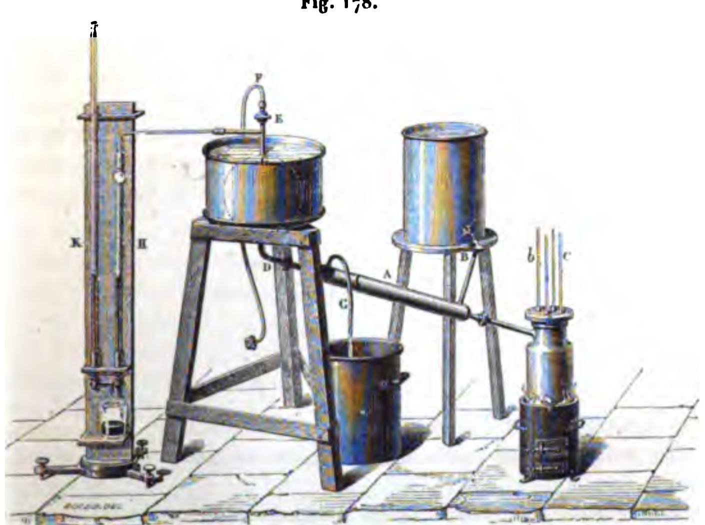
III. *A des températures quelconques.* — Après un travail considérable exécuté, en 1829, par Dulong et Arago, M. Regnault détermina les forces élastiques de la vapeur d'eau par une méthode due à Dalton, et qui repose sur ce principe, déjà indiqué précédemment, qu'à la température de l'ébullition d'un liquide la force élastique de sa vapeur est égale à la pression qu'il supporte. Conséquemment, si l'on fait bouillir l'eau dans une enceinte fermée, sous des pressions que l'on déter-

minera, elle atteindra des températures d'ébullition qui croîtront en même temps; on les mesurera, et, pour chaque cas, la force élastique de la vapeur à ces températures sera égale à la pression exercée.

La vapeur se forme dans une cornue de cuivre épais chauffée par un petit fourneau (*fig.* 178). Quatre tubes soudés dans le couvercle, ouverts



Fig. 178.



par le haut et fermés par le bas, plongent dans l'intérieur à des profondeurs différentes. C'est dans ces tubes et au milieu d'une masse d'huile qui les remplit que l'on introduit les thermomètres *b*, *c* destinés à mesurer la température de la vapeur en ses différents points. Le col de la cornue est constitué par un tube AD qui se dirige en montant vers un réservoir G dans lequel il débouche; il est enveloppé par un manchon A où l'on fait constamment passer un courant d'eau froide de B en C. De cette façon les vapeurs se condensent aussitôt que l'ébullition les amène dans le col, et le liquide qui résulte de cette liquéfaction retombe dans la cornue qui ne se vide jamais et où la pression demeure constante. Le réservoir G est une sphère de cuivre; il a une capacité très-grande; il est soutenu dans une cuve de zinc remplie d'eau et n'éprouve pendant la durée des expériences que des variations de température insignifiantes; il est mis en rapport par un tube à robinet EF, soit avec une machine pneumatique, soit avec une pompe de compression, ce qui permet de maintenir dans tout l'appareil

une pression égale, constante et aussi faible ou aussi grande qu'on le veut enfin il est en communication soit avec un baromètre différentiel, soit avec un manomètre à air libre HK pour mesurer la pression, suivant qu'elle est inférieure ou supérieure à celle de l'atmosphère. Pour le cas des pressions très-élevées, on employait un appareil plus résistant et le grand manomètre à air libre qui a servi à l'étude de la loi de Mariotte. Les expériences furent poussées jusqu'à 230 degrés et 30 atmosphères.

M. Regnault traça ensuite une courbe graphique dont les ordonnées exprimaient les résultats observés, puis il chercha, comme l'avaient déjà fait avant lui plusieurs physiciens, à représenter par une formule empirique les valeurs des forces élastiques de la vapeur d'eau à différentes températures. On a proposé, dans ce but, un grand nombre de formules, dont nous ne citerons que deux, celle de M. Roche et celle de Biot. M. Roche, guidé par des vues théoriques, est arrivé à la formule suivante :

$$\log \frac{F}{760} = \frac{0{,}1644\,(t-100)}{11 + 0{,}03\,(t-100)}.$$

Mais la formule empirique proposée par Biot,

$$\log F = a + b\alpha^t + c\beta^t,$$

dans laquelle il faut déterminer les coefficients a, b, c, α, β, a paru à M. Regnault se prêter mieux que les autres au calcul de ses observations.

Nous transcrivons ici deux Tables des forces élastiques : la première de 10 en 10 degrés depuis — 30 jusqu'à 230 degrés, et l'autre de dixième en dixième de degré entre 99 et 101 degrés.

TEMPÉRATURE.	ÉLASTICITÉ en millimètres	TEMPÉRATURE.	ÉLASTICITÉ en millimètres.
— 30	0,386	110	1075,370
— 20	0,927	120	1491,280
— 10	2,093	130	2030,28
0	4,600	140	2717,63
10	9,165	150	3581,23
20	17,391	160	4651,62
30	31,548	170	5961,66
40	54,906	180	7546,39
50	91,982	190	9142,70
60	148,791	200	11688,96
70	233,093	210	14324,80
80	354,643	220	17390,35
90	525,450	230	20926,40
100	760,000		

TEMPÉRATURE	ÉLASTICITÉ en millimètres.	TEMPÉRATURE.	ÉLASTICITÉ en millimètres.
99,0	733,21	100,1	762,73
99,1	735,85	100,2	765,46
99,2	738,50	100,3	768,20
99,3	741,16	100,4	770,95
99,4	743,83	100,5	773,71
99,5	746,50	100,6	776,48
99,6	749,18	100,7	779,26
99,7	751,87	100,8	782,04
99,8	754,57	100,9	784,83
99,9	757,28	101,0	787,63
100,0	760,00		

Détermination du point 100 degrés. — La dernière de nos Tables fait connaître les forces élastiques correspondant à des températures voisines de 100 degrés, ou inversement les températures de l'ébullition de l'eau sous des pressions voisines de 760 millimètres. C'est à cette Table que l'on a recours pour déterminer le deuxième point fixe du thermomètre. Il suffit pour cela de placer cet instrument dans la vapeur d'eau bouillante, d'observer la pression H du baromètre pendant cette expérience et de marquer au point où s'arrête le mercure dans le thermomètre la température qui correspond à la pression H dans la Table précédente.

Thermomètre hypsométrique. — On fait une seconde application de cette Table. A mesure que l'on s'élève dans l'atmosphère, la pression diminue et en même temps la température d'ébullition de l'eau s'abaisse. Cette pression et cette température sont deux nombres qui se correspondent dans notre Table. On peut donc, au lieu de mesurer la pression par le baromètre, mesurer la température de l'ébullition de l'eau et chercher dans la Table la tension correspondante. Cette opération exige un thermomètre très-sensible et tel, que le mercure parcoure toute la longueur de la tige pour des températures comprises entre 80 et 100 degrés environ. Un appareil de ce genre peut servir à déterminer la hauteur des montagnes.

III. — DE LA DENSITÉ DES VAPEURS.

Le plus remarquable des changements survenu dans les corps qui se vaporisent est un énorme accroissement de volume et conséquemment une énorme diminution de densité, il faut la mesurer. Nous supposerons dans ce qui va suivre que les vapeurs sont prises à une tension inférieure à leur tension maxima, et que par conséquent elles se dilatent et se compriment

comme les gaz. Nous définirons leur densité comme on définit celle des gaz : le rapport de leur poids à celui d'un égal volume d'air pris à la même température et à la même pression.

Soit π le poids d'un volume v de vapeur à une température t et à une pression h ; le poids p du volume d'air correspondant est donné par la formule

$$p = v\,(1^{gr},293187)\,\frac{h}{(1+at)\,760}.$$

Dès lors, la densité de la vapeur est

$$\rho = \frac{\pi}{p} = \frac{\pi(1+at)\,760}{v\,h\,(1^{gr},293187)}.$$

Pour trouver la densité d'une vapeur, il faudra donc mesurer π, v, t et h, et calculer ρ par la formule précédente.

Procédé de Gay-Lussac. — Une marmite de fonte F, qui contient du mercure et qui peut être placée sur un fourneau (*fig.* 179), sert de réservoir et de support à l'appareil tout entier. Une large éprouvette graduée AB, remplie elle-même de mercure, repose sur le fond de la marmite, où elle est appuyée par un anneau de métal A que porte une tige de fer CC; elle est enveloppée par un manchon de verre qui est garni à sa base d'une virole de fer et qui se fixe sur le fond de la marmite par un mouvement de baïonnette. Enfin une vis affleurante E sert à trouver le niveau extérieur du mercure.

Fig. 179.



On prépare une petite ampoule de verre mince, contenant un poids connu de liquide, ce sera le poids π de la vapeur que l'on va former. On introduit cette ampoule dans l'éprouvette AB, et l'on échauffe tout l'appareil sur un fourneau. L'ampoule crève, le liquide se vaporise brusquement et le mercure baisse dans la cloche. Alors, au moyen d'un agitateur D, on mêle les couches d'eau, et à un moment donné on mesure : 1° la température t de l'eau, qui est celle de la vapeur.

2° le volume apparent v_0 que cette vapeur occupe dans la cloche : $v_0(1 + kt)$ est le volume v ; 3° la différence de hauteur h' du mercure à l'intérieur et à l'extérieur. Ramenée à zéro, cette hauteur est $\frac{h'}{1 + mt}$, et en la retranchant de la pression atmosphérique, on obtient la pression h de la vapeur.

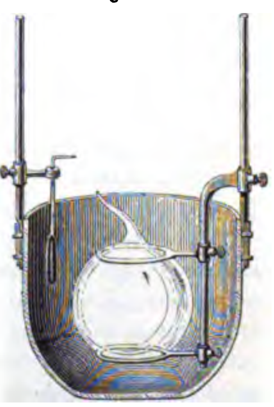
Il faut être assuré que tout le liquide est vaporisé : cela aura lieu si la force élastique mesurée h est moindre que la tension maximum à cette température.

Procédé de M. Dumas. — On prend un ballon de verre mince, d'une capacité d'environ $\frac{1}{2}$ litre ; on y introduit 15 à 20 grammes de la substance solide ou liquide que l'on veut étudier, et l'on effile le col à la lampe. Ensuite, on fixe le ballon sur un support entre deux anneaux qui le pressent (*fig.* 180 et 181) ; on l'introduit dans une marmite de fonte au milieu d'une

Fig. 180.



Fig. 181.



masse d'eau ou d'huile, ou même d'alliage fusible, suivant que le point d'ébullition de la substance est plus ou moins élevé, et l'on chauffe jusqu'à une température très-supérieure à ce point. Bientôt il se produit un jet de vapeur qui s'échappe avec bruit par l'ouverture effilée, qui chasse l'air du ballon, et qui cesse brusquement quand il n'y a plus rien à vaporiser. A ce moment, il ne reste dans le ballon que de la vapeur à une pression inférieure à son élasticité maximum, et l'on ferme le col par un trait de chalumeau. Cherchons h, t, π et v.

La pression h de la vapeur est égale à celle de l'atmosphère ; on la trouve en consultant le baromètre. La température est celle du bain, elle se mesure, au moment où l'on clôt le ballon, avec des thermomètres soit à mer-

cure, soit à air. Soient P et P′ les poids du ballon avant l'expérience et quand l'air y a été remplacé par la vapeur. P′ est égal P, plus le poids π de la vapeur, moins le poids de l'air déplacé par le volume intérieur du ballon qui est $v_0(1,293)(1+k\theta)$, en désignant par v_0 ce volume à zéro et par θ la température de la pesée. On a donc

$$P' = P + \pi - v_0(1,293)(1+k\theta),$$

équation qui nous donnera π si nous connaissons le volume v_0.

Pour trouver ce volume, on casse la pointe sous l'eau. Comme la vapeur s'est condensée par le refroidissement, le ballon est vide et l'eau s'y précipite pour le remplir en totalité; on le pèse une dernière fois et l'on trouve P″

$$P'' = P + v_0(1+k\theta')\left(\frac{1}{1+\delta} - 1,293\right),$$

où δ est la dilatation de l'eau. Cette équation fait connaître v_0, et permet de trouver π.

Il ne reste plus qu'à trouver le volume v de la vapeur : c'est celui du ballon à la température t quand il a été fermé,

$$v = v_0(1+kt).$$

On peut maintenant calculer ρ en remplaçant, dans la formule (1), h, t, π et v par leurs valeurs.

Pour appliquer ce procédé à des substances qui n'entrent en ébullition qu'à des températures très-élevées, MM. Henri Sainte-Claire Deville et Troost ont remplacé le ballon de verre par un ballon de porcelaine, et les bains liquides par des vases où l'on faisait bouillir du mercure, du soufre, du cadmium ou du zinc, ce qui donnait des températures très-élevées et constantes, savoir : le mercure de 350 degrés, le soufre de 400, le cadmium de 860 et le zinc de 1040 degrés. Toutefois, comme il pouvait y avoir une erreur sur ces températures, on opérait à la fois sur deux ballons voisins, l'un contenant de l'iode qui servait de terme de comparaison et dont la densité ρ est 8,716, l'autre renfermant la substance dont on voulait avoir la densité ρ'. On avait

$$\rho' = \frac{\pi'}{v'}\,\frac{(1+at)760}{(1,293)h}, \qquad \rho = \frac{\pi}{v}\,\frac{(1+at)760}{(1,293)h} = 8,716;$$

par suite

$$\frac{\rho'}{\rho} = \frac{\pi'}{\pi}\,\frac{v}{v'}, \qquad \rho' = \frac{\pi'}{\pi}\,\frac{v}{v'}\,8.716.$$

Densité théorique des gaz et des vapeurs. — La mesure de la densité des gaz ou des vapeurs fournit aux sciences chimiques un de leurs

éléments les plus essentiels, que l'on doit à Gay-Lussac. Il avait découvert que si deux gaz ou deux vapeurs se combinent, les volumes des composants et du composé peuvent être exprimés par des nombres entiers très-simples. Si, conformément à cette loi, on désigne ces nombres par m, m', m'' pour les deux éléments et le composé qu'ils forment, et par d, d', d'' les densités des trois gaz, leurs poids respectifs seront proportionnellement md, $m'd'$, $m''d''$ et l'on aura

$$md + m'd' = m''d''.$$

Cette formule, qui établit une relation entre six quantités, peut servir à déterminer l'une quelconque d'entre elles, et en particulier l'une des trois densités, que l'on nomme la *densité théorique* du gaz. Elle est vérifiée pour les gaz composés; Gay-Lussac l'étendit aux vapeurs. Ainsi, la vapeur d'eau est composée de deux volumes d'hydrogène et d'un volume d'oxygène, condensés en deux volumes; cela donne $m = 2$, $m' = 1$, $m'' = 2$. Les densités d et d' de l'hydrogène et de l'oxygène sont 0,069 et 1,106, on a donc

$$2(0,069) + 1,106 = 2d'',$$

d'où l'on tire $d'' = 0,623$; les mesures directes ont donné aussi 0,623, ou bien $\frac{5}{8}$.

Quand les densités des trois corps composants et composé sont connues, ainsi que les volumes m et m' des éléments, on peut calculer par la même formule le nombre m'' ou le volume de la combinaison. Ainsi, la vapeur d'eau étant formée de deux volumes d'hydrogène (densité = 0,069) et d'un volume d'oxygène (densité = 1,106), et la densité de la vapeur d'eau ayant été trouvée expérimentalement égale à 0,623, nous avons

$$2(0,069) + 1,106 = m''(0,623)$$

d'où $m'' = 2$.

Le tableau suivant contient les densités d'un grand nombre de composés rapportées soit à l'air, soit à l'hydrogène. Tous les corps composés qu'on y trouve forment deux volumes de vapeur.

Noms des substances.	Formules.	DENSITÉS. Air = 1.	Hydrogène = 1
Air	»	1,000	14,44 = $\frac{101}{7}$
Hydrogène	H	0,069	1,0
Chlore	Cl	2,422	34,9
Brome	Br	5,54	79,9
Iode	I	8,716	125,8
Carbone (calculé)	C	0,832	12,0
Oxygène	O	1,106	16,0
Soufre à 1000 degrés	S	2,22	32,0
Azote	Az	0,971	14,0

Noms des substances.	Formules.	Densités. Air = 1.	Densités. Hydrogène = 1
Acide chlorhydrique........	HCl	1,247	18,0
Eau	H^2O	0,623 = $\frac{5}{8}$	9,0
Acide sulfureux	SO^2	2,234	32,2
Acide sulfurique...........	SO^3	2,763	39,9
Protoxyde d'azote..........	Az^2O	1,527	22,0
Bioxyde d'azote	AzO^2	1,039	15,0
Ammoniaque..............	AzH^3	0,591	8,5
Phosphore....	Ph	4,42	63,8
Arsenic	As	10,6	152,8
Oxyde de carbone.........	CO	0,967	13,9
Acide carbonique...........	CO^2	1,529	22,1
Gaz des marais	CH^4	0,559	8,1
Perchlorure d'étain	$SnCl^4$	9,199	132,7
Chlorure de bismuth.......	$BiCl^3$	11,35	163,9
Mercure...................	Hg	6,976	100,7
Alcool	C^2H^6O	1,613	23,3
Éther.....................	$C^4H^{10}O$	2,586	37,3
Essence de térébenthine	$C^{10}H^{16}$	4,764	68,7

IV. — LES VAPEURS SONT DES GAZ ET RÉCIPROQUEMENT.

Les gaz sont caractérisés par deux propriétés : 1° ils suivent la loi de Mariotte, c'est-à-dire exercent une pression en raison inverse de leur volume; 2° ils se dilatent également de $\frac{1}{273}$ de leur volume par chaque degré. Si les vapeurs suivent ces lois on conclura que ce sont des gaz.

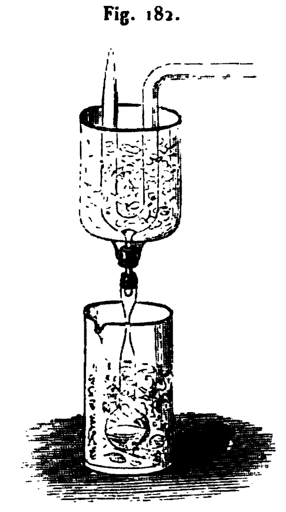
Or on vient de mesurer leur densité, et le résultat général de ces mesures est que cette densité est constante pour la même vapeur, quelles que soient la température et la pression auxquelles elle a été déterminée. Mais la densité est le rapport du poids de la vapeur à celui d'un égal volume d'air; pour qu'il soit constant il faut que la vapeur et l'air se dilatent également et se compriment également. Les vapeurs sont donc des gaz.

Les vapeurs ont une limite, leur tension maximum, qui croît avec la température. Plus comprimées, elles retournent à l'état liquide; moins pressés, les liquides bouillent et se vaporisent. Nous allons prouver qu'il en est de même pour les gaz. Nous étudierons successivement l'effet du refroidissement, de la pression, et des deux moyens combinés.

I. **Refroidissement.** — Les acides sulfureux et hypo-azotiques, le cyanogène et même l'ammoniaque se liquéfient par le refroidissement. On fait

l'expérience en dirigeant le gaz à travers un tube en U (*fig.* 182) prolongé inférieurement par un ballon, et en entourant l'appareil d'un mélange réfrigérant. Au bout d'un temps suffisant, on sépare le ballon pour fermer son extrémité à la lampe, et le liquide qui s'est formé pendant le refroidissement peut se conserver ensuite à la température ordinaire pourvu que le verre où il est enfermé soit assez épais pour résister à la pression du gaz qui tend à se reproduire.

Fig. 182.



D'après MM. Loir et Drion, l'acide carbonique lui-même, refroidi jusqu'à 100 degrés au-dessous de zéro, non-seulement se liquéfie, mais devient solide et se prend en cristaux réguliers.

II. **Pression.** — Pour liquéfier les gaz par la pression, on peut enfermer dans des vases suffisamment résistants les produits chimiques qui dégagent ces gaz par leur réaction. Forcés de s'accumuler dans un espace restreint, ils passent à l'état liquide. Nous citerons, comme exemple, la liquéfaction de l'ammoniaque par Faraday. Ce physicien prit un siphon de verre épais (*fig.* 183), fermé à un bout, ouvert et effilé par l'autre, et dont la branche fermée était remplie de chlorure d'argent. Il y fit arriver de l'ammoniaque qui fut absorbée par ce sel, puis il scella à la lampe l'extrémité restée ouverte et il la plongea dans un mélange réfrigérant, en même temps qu'il échauffait le chlorure. L'ammoniaque se dégagea et vint s'accumuler dans la partie refroidie où elle se condensa sous la forme d'un liquide transparent. En revenant ensuite à la température ordinaire, le chlorure absorbe le gaz de nouveau, et l'appareil préparé une fois pour toutes sert à reproduire la même expérience quand on veut la recommencer.

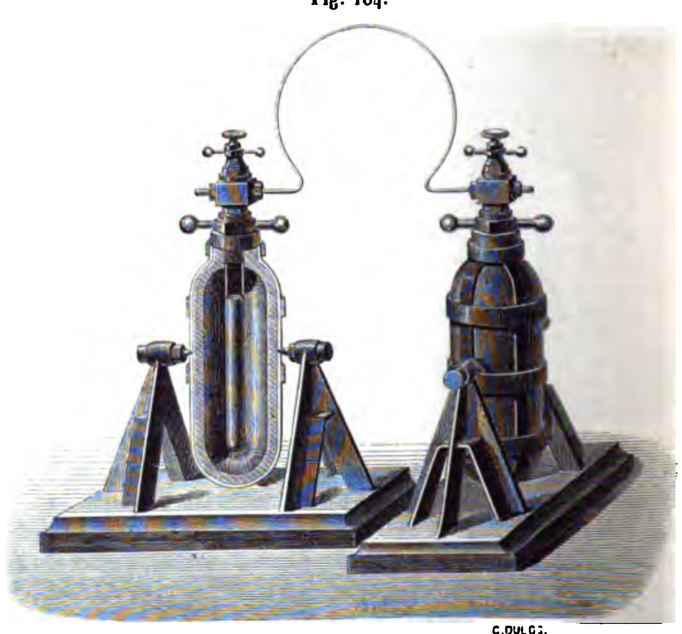
Fig. 183.



Thilorier a liquéfié l'acide carbonique par un procédé analogue. Son appareil se compose de deux cylindres de fonte (*fig.* 184), à parois très-épaisses, entourés de bandes de fer doux et fermés par des bouchons à vis. Ces bouchons sont percés d'ouvertures qui permettent de faire communiquer les deux réservoirs entre eux par un conduit de cuivre, ou bien avec l'atmosphère. Dans l'un des cylindres on introduit les substances destinées

à dégager le gaz, c'est-à-dire le bicarbonate de soude et l'acide sulfurique que l'on verse dans un tube de cuivre. On ferme ensuite le cylindre et on le fait tourner autour d'un axe horizontal pour mélanger le con-


Fig. 184.



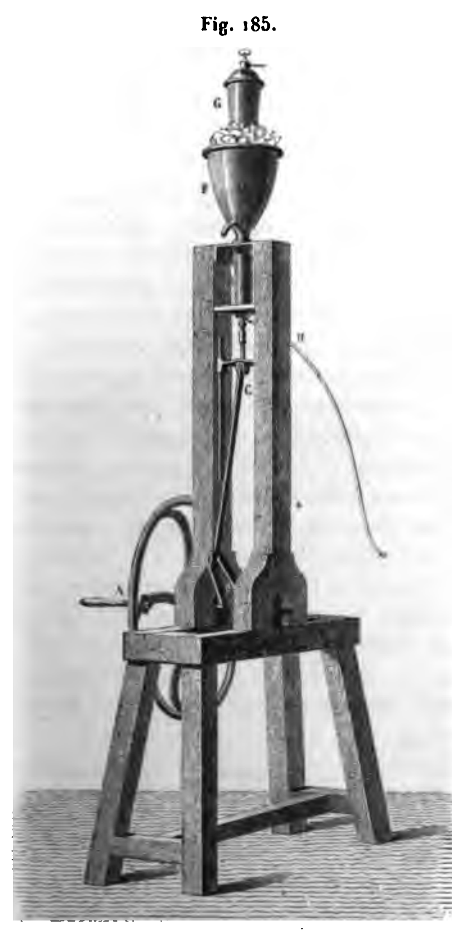
tenu. La réaction se fait, l'acide carbonique atteint environ 80 atmosphères de pression, se liquéfie et se mêle aux matières qui l'ont produit. Pour l'avoir pur, on le distille, en ouvrant le conduit de cuivre par lequel il se rend dans le second réservoir, où la presque totalité de l'acide carbonique passe à l'état liquide.

III. **Refroidissement et pression.** — On peut enfin employer pour la liquéfaction des gaz l'appareil de M. Bianchi (*fig.* 185). C'est une pompe foulante verticale E dont le piston, fort petit, se meut par l'intermédiaire d'une bielle C glissant entre des directrices verticales D et recevant le mouvement d'une manivelle à volant A. Cette pompe puise dans des cloches le gaz bien desséché et bien pur et le chasse dans le réservoir G qui est formé d'une première enveloppe de cuivre mince, entourée d'une chemise épaisse en fer forgé et foré. Une soupape permet au gaz de s'y introduire et empêche le liquide de sortir; enfin une ouverture étroite, qui se ferme

par la pression d'un bouchon à vis que l'on voit au sommet, laissera échapper le liquide quand le réservoir sera dévissé, retourné et ouvert. Pour absorber la chaleur qui se dégage par la liquéfaction, on entoure le réservoir d'un seau F rempli de glace.

Propriétés des gaz liquéfiés. — Les liquides que l'on obtient ainsi possèdent des propriétés fort curieuses; ils sont en général incolores et très-fluides; ils attaquent les mastics qui ferment les appareils, ne se mêlent pas à l'eau, mais se dissolvent très-bien dans l'alcool et l'éther. Le protoxyde d'azote garde la faculté qu'il possédait à l'état de gaz d'entretenir la combustion, et un morceau de charbon rouge que l'on projette à sa surface continue d'y brûler très-énergiquement en le décomposant.

Fig. 185.



Quand on enferme ces corps dans des vases, ils ne s'y conservent qu'à la faveur d'une pression énergique, et c'est une portion de leur masse restée à l'état de gaz qui comprime la partie qui est liquéfiée. Aussitôt que l'on ouvre les vases, ce gaz s'échappe très-bruyamment, et le liquide, ramené tout à coup à la pression atmosphérique, commence et continue à bouillir activement. Il absorbe la chaleur de fusion, et sa température baisse jusqu'à atteindre une limite fixe pour chacun d'eux et qui est, par exemple, égale à — 12 degrés pour l'acide sulfureux et à — 88 degrés pour le protoxyde d'azote : c'est le point d'ébullition. Ces phénomènes

sont identiques à ceux que nous offrent les liquides ordinaires quand on les place dans les mêmes conditions, et en particulier l'eau dans la marmite de Papin.

Nous avons dit que la température d'ébullition de l'oxyde d'azote est de — 88 degrés; à ce moment il est fort dangereux de tenir à la main les vases qui le contiennent, car ils refroidissent instantanément les organes, congèlent le sang, et les tissus se désorganisent ensuite avec une sensation de cuisson tout à fait pareille à celle qui résulte d'une brûlure. Si l'on verse de l'eau dans le vase, elle s'y congèle aussitôt; le mercure lui-même y prend l'état solide, et affecte ensuite toutes les propriétés d'un métal malléable analogue au plomb : on a donc ainsi un moyen de déterminer des abaissements de température extrêmement considérables.

Acide carbonique solide. — Quand on a condensé l'acide carbonique dans le récipient F de l'appareil de Thilorier (*fig.* 184) et qu'on projette le liquide dans l'air par un tube très-fin, une partie s'évapore et refroidit l'autre, qui se congèle alors sous forme de flocons blancs qu'on recueille dans une boîte sphérique de métal où cette neige tourbillonne et s'agglomère en masses compactes. A cet état, l'acide carbonique marque — 78 degrés; il tend à se réchauffer, mais il émet des vapeurs qui le refroidissent; et comme il est mauvais conducteur, ce réchauffement se fait lentement, et l'évaporation n'est pas rapide, ce qui fait qu'on peut le conserver pendant très-longtemps sans qu'il diminue beaucoup de volume, tout en restant à 78 degrés au-dessous de zéro. On emploie ce corps comme réfrigérant, en le mêlant avec de l'éther, ce qui forme une pâte analogue à la neige fondante, qui se met en contact plus intime avec les substances qu'on y plonge et congèle instantanément le mercure. Si on le place dans le vide d'une machine pneumatique, l'évaporation de l'acide est activée, et la température baisse encore. Voici le tableau des températures obtenues, en regard des pressions sous lesquelles on a maintenu le mélange : on remarquera qu'il est possible d'arriver à — 110 degrés : c'est le plus grand froid qu'on ait jamais obtenu.

Température.	Pression.	Température.	Pression.
— 77°	721mm	— 95°	86mm
— 80	493	— 99	61
— 85	239	— 107	35
— 87	188	— 110	30
— 91	137		

En combinant les deux procédés que nous avons décrits, l'abaissement de température et l'augmentation de pression, M. Faraday a pu liquéfier tous les gaz, excepté l'oxygène, l'hydrogène, l'oxyde de carbone, le bioxyde

d'azote et l'hydrogène protocarboné ou gaz des marais. Malgré ces exceptions, dont le nombre diminuera quand on pourra augmenter les moyens d'action, on peut considérer la loi de liquéfaction comme générale, et ranger tous les gaz parmi les vapeurs.

Tension maximum des gaz. — Les pressions auxquelles les gaz se liquéfient représentent leurs tensions maxima aux températures où on les prend, et, d'autre part, ces températures sont celles de l'ébullition des liquides formés par ces gaz sous les pressions correspondantes. Le tableau qui suit résume les résultats obtenus à ce sujet par Faraday.

TEMPÉRATURE.	PRESSIONS EN ATMOSPHÈRES.					
	GAZ oléfiant.	ACIDE carbonique.	PROTOXYDE d'azote.	ACIDE chlorhydrique.	HYDROGÈNE sulfuré.	HYDROGÈNE arséniqué.
— 87,2°	"	"	1,0	"	"	"
— 73,3	9,3	1,8	1,8	1,8	1,0	0,0
— 56,7	12,5	5,3	4,1	4,0	1,6	1,1
— 40,0	17,0	11,1	8,7	7,7	2,9	2,3
— 28,9	21,2	16,3	13,3	10,9	4,2	3,5
— 12,2	31,7	26,8	22,9	17,7	7,2	6,2
— 1,1	42,5	37,2	31,1	25,3	9,9	8,0
+ 4,4	"	"	"	30,0	11,8	10,6

TEMPÉRATURE.	ACIDE SULFUREUX.	CYANOGÈNE.	AMMONIAQUE.
— 18,0°	0,7	1,2	2,5
0,0	1,5	2,4	4,4
+ 41,4	1,8	2,8	5,0
+ 32,0	4,3	6,2	11,0
+ 38,0	5,1	7,3	"

Les gaz une fois liquéfiés peuvent ensuite passer à l'état solide comme les autres liquides, à une température fixe qui est leur point de fusion. En résumé, les gaz sont des vapeurs et réciproquement; tous les corps peuvent être successivement solides, liquides et gazeux, c'est une question de température et de pression.

V. — LA VAPORISATION EST UN TRAVAIL. — SON ÉQUIVALENT THERMIQUE.

Toute vaporisation est accompagnée d'une disparition de chaleur.

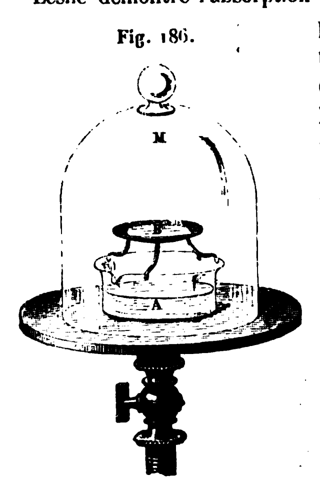
Cette loi se prouve par la constance du point d'ébullition : puisqu'un liquide bouillant sur un foyer conserve toujours la même température, il faut que la chaleur de ce foyer soit absorbée par la vapeur et disparaisse sans qu'il y ait aucun effet thermométrique produit. On remarque également que l'évaporation de l'eau ou de l'éther sur une partie du corps la refroidit aussitôt.

Pour mesurer cette chaleur perdue, Black mit sur un poêle un vase plein d'eau et compara les temps nécessaires : 1° pour l'échauffer de zéro à 100° ; 2° pour la vaporiser tout entière. Il trouva le second cinq fois et demie égal au premier ; il en conclut qu'il faut dépenser 550 calories pour vaporiser 1 kilogramme d'eau sans l'échauffer.

Réciproquement, la vapeur qui se condense rend libres les 550 calories qu'elle avait empruntées pour se former. On le prouve en faisant passer 1 kilogramme de vapeur dans $5^{kg},50$ d'eau à zéro : celle-ci s'échauffe jusqu'à 100 degrés, moins l'abaissement qu'elle éprouve par le refroidissement pendant le temps que dure l'expérience.

Leslie démontre l'absorption de la chaleur par l'expérience suivante. Il place sous la cloche de la machine pneumatique (*fig.* 186) un cristallisoir A plein d'acide sulfurique concentré, afin d'absorber les vapeurs d'eau, et sur ce vase il pose une capsule de laiton B dans laquelle il a versé une petite quantité d'eau. Si l'on fait le vide, l'eau bout rapidement. Sa vapeur est absorbée aussitôt que formée, et l'ébullition se continue indéfiniment. Mais en passant à l'état gazeux, le liquide perd la chaleur de vaporisation ; il se refroidit progressivement et se congèle. Si l'on emploie d'autres liquides, la même cause produit toujours un abaissement de température ; il est d'autant plus grand que le liquide est plus vaporisable. Avec l'acide sulfureux on congèle le mercure, et un mélange d'acide carbonique et d'éther atteint — 110 degrés.

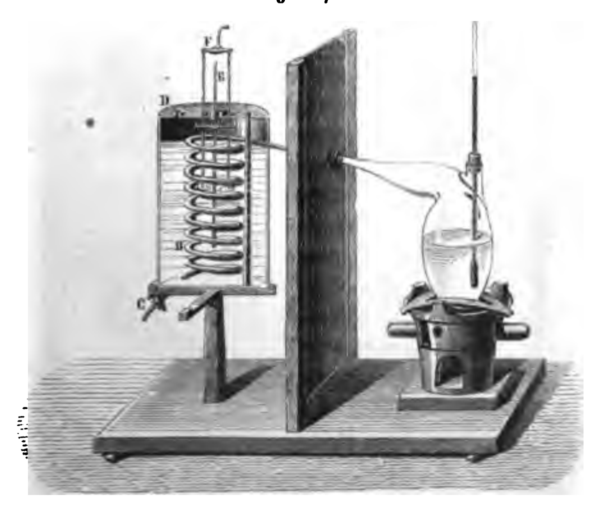
Fig. 186.



Un fait entièrement semblable s'est rencontré déjà dans la fusion des corps. La théorie ancienne ne peut expliquer la disparition de la chaleur ni pendant la fusion ni pendant l'évaporation; au contraire, la théorie thermodynamique prévoit le second phénomène avec la même facilité que le premier. Pendant que les molécules sont à l'état liquide et tenues à une petite distance, elles se repoussent et se tiennent en tension. Viennent-elles à s'écarter pour faire de la vapeur, elles font à la fois un travail extérieur comme les gaz qui se dilatent, et un travail intérieur qui les sépare : de là deux pertes de force vive et, par suite, de chaleur. Nous désignerons par *chaleur de vaporisation*, le nombre λ de calories qui disparaissent pendant la vaporisation de 1 kilogramme de liquide : c'est ce que l'on a nommé jusqu'à présent *chaleur latente*; 430λ sera l'équivalent mécanique de la vaporisation.

Mesure de la chaleur de vaporisation. — On distille dans une cornue un poids p du liquide que l'on veut étudier; on fait passer la vapeur d'abord dans un serpentin entouré d'huile échauffée où elle prend

Fig. 187.



une température T supérieure au point d'ébullition du liquide, ensuite dans un calorimètre, dont elle élève la température depuis t jusqu'à θ. Alors : 1° elle passe de T à la température de sa condensation $\mathfrak{T}$ et perd $pc''(T - \mathfrak{T})$; 2° elle se liquéfie et cède $p\lambda$; 3° le liquide provenant de la condensation

s'abaisse de ϖ à θ et abandonne $pc'(\varpi - \theta)$. On a

$$pc''(T - \varpi) + p\lambda + pc'(\varpi - \theta) = P(\theta - t).$$

On recommence la même opération en échauffant la même vapeur à une autre température T_1 très-différente de T, et l'on a la deuxième équation

$$p'c''(T_1 - \varpi) + p'\lambda + p'c'(\varpi - \theta_1) = P(\theta_1 - t_1).$$

Ces deux équations permettent de calculer c'' et λ.

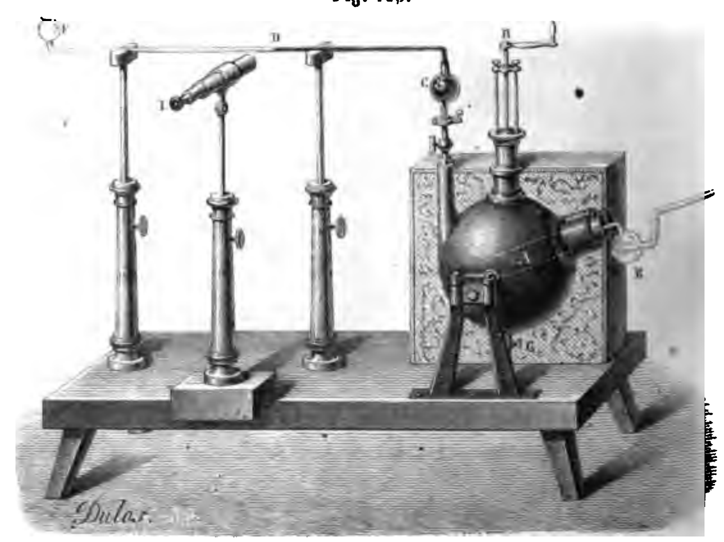
On peut se contenter de distiller le liquide dans une cornue (*fig* 187). et, sans échauffer la vapeur produite, de la condenser dans le serpentin B. T et T_1 sont alors égaux à ϖ. Les deux équations précédentes deviennent toutes deux

$$p\lambda + pc'(\varpi - \theta) = P(\theta - t),$$

d'où l'on tire x si l'on connaît c'. Mais cette méthode est sujette à de nombreuses causes d'erreurs. MM. Favre et Silbermann ont opéré avec un appareil fondé sur un principe différent.

Appareil de Favre et Silbermann. — C'est une sphère A (*fig.* 188), de fer ou de verre, qui forme la boule d'un gros thermomètre à mercure dont la tige est

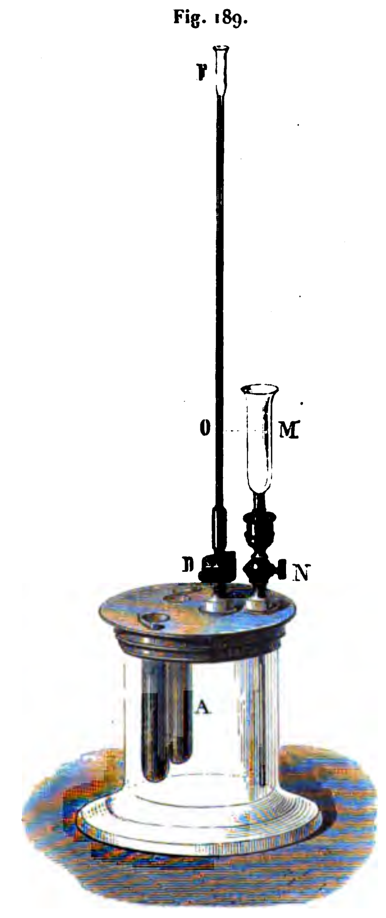
Fig. 188.



CDF; dans la sphère A sont plusieurs moufles métalliques. Si l'on y fait pénétrer une quantité déterminée de chaleur Q, le mercure se dilate et s'avance dans

CD. Soit P le poids du mercure, C sa chaleur spécifique, D sa densité, m son coefficient de dilatation apparente, $t' - t$ l'élévation de température. On a

Fig. 189.



$$Q = PC(t' - t), \quad V' - V = Vm(t' - t),$$

$$Q = (V' - V)\frac{CD}{Km};$$

la quantité de chaleur est donc proportionnelle à la dilatation observée $V' - V$.

Il est nécessaire de pouvoir ramener le sommet de la colonne au commencement de la tige CD. MM. Favre et Silbermann se servent d'un piston plongeur B. J'ai remplacé ces dispositions par celles de la *fig.* 189 : un entonnoir MN, muni d'un robinet, permet d'obtenir dans le tube DF un niveau sensiblement constant.

Pour mesurer les chaleurs de vaporisation, on introduit le col d'une pipette dans le moufle, on chauffe en E (*fig.* 188), et on fait pénétrer à l'intérieur une petite quantité de vapeur qui échauffe le thermomètre.

Voici quelques nombres obtenus par MM. Favre et Silbermann :

	Chaleur latente.
Eau	536
Esprit de bois	263
Alcool absolu	208
Acide formique	169
Acide acétique	102
Éther sulfurique	91
Essence de térébenthine	69
Essence de citron	70

Chaleur latente de la vapeur d'eau. — On doit à M. Regnault un nombre considérable d'expériences sur ce sujet. Son appareil pouvait être soumis à des pressions très-élevées, de façon que l'ébullition dans la cornue se faisait à des températures plus ou moins hautes qu'on pouvait faire varier à volonté. En outre, des dispositions spéciales permettaient d'éviter certaines erreurs auxquelles donne lieu l'appareil de la *fig.* 187.

Ces expériences ont conduit aux résultats suivants. Quand on échauffe

de l'eau de o à T degrés et qu'on la volatilise en totalité à T degrés, elle exige une quantité totale de chaleur Q donnée par la formule

$$Q = 606{,}5 + 0{,}305.T.$$

D'autre part, on sait que pour l'élever à T degrés sans la volatiliser, elle exige une quantité de chaleur T; donc, elle prend pour se volatiliser une chaleur latente

$$\lambda = Q - T = 606{,}5 - 0{,}695.T.$$

Ainsi, un kilogramme de vapeur à T degrés contient une quantité totale de chaleur Q qui croît avec T, mais pour former cette vapeur à T degrés il faut employer une chaleur λ qui décroît avec T.

VI. — COMMENT SE FORMENT LES VAPEURS : 1° PAR ÉVAPORATION.

Dans l'atmosphère tout liquide se réduit peu à peu en vapeur et disparaît; il s'évapore.

La rapidité avec laquelle se fait l'évaporation a été étudiée par Dalton. Il suspendait au plateau d'une balance un vase plat rempli d'eau, et la perte de poids qu'il observait après un temps déterminé exprimait la quantité de liquide évaporé.

1° Il fit d'abord cette expérience dans l'air sec, avec de l'eau maintenue à des températures fixes, comprises entre 40 et 100 degrés. Il reconnut que la quantité d'eau évaporée E, pendant l'unité de temps, est proportionnelle à la force élastique de la vapeur aux températures de l'expérience.

2° Dans une atmosphère contenant de la vapeur d'eau, l'évaporation E se trouva proportionnelle à la différence $(F - f)$, entre la tension maximum et la tension actuelle de la vapeur contenue dans l'air au moment de l'expérience.

3° E est en outre proportionnelle à la surface S du liquide. Si donc on désigne par C un coefficient constant, les observations de Dalton se résument par la formule

$$E = CS(F - f),$$

qui s'applique à l'air sec en faisant $f = 0$.

A mesure que la pression atmosphérique H diminue, les phénomènes se rapprochent de ceux qui se produisent dans le vide; c'est-à dire que l'évaporation devient de plus en plus rapide. On admet que le poids E est en

raison inverse de H; nous pourrons par conséquent poser $C = \frac{BS}{H}$, et nous aurons

$$(1) \qquad E = \frac{BS}{H}(F - f).$$

Cette formule s'applique à l'air calme; quand il est plus ou moins agité, l'évaporation est plus ou moins abondante. En effet, la couche d'air en contact avec l'eau commence par se saturer de vapeur. Si elle reste immobile, elle arrête l'évaporation; si, au contraire, elle se renouvelle, l'évaporation se renouvelle aussi et le liquide diminue d'une manière plus rapide.

Les divers liquides s'évaporent plus ou moins. Dalton, ayant comparé l'alcool et l'eau, trouva que la même formule leur est applicable à tous deux avec le même coefficient. Il n'y a donc, pour passer de l'un à l'autre, qu'à remplacer dans la formule la force élastique de l'eau par celle de l'alcool, et celle-ci étant plus grande, l'alcool doit s'évaporer beaucoup plus rapidement. En général, les liquides les plus aisément vaporisables sont ceux qui ont le point d'ébullition le plus bas. Inversement les liquides qui ont un point d'ébullition élevé se vaporisent très-peu. On n'a jamais pu, en effet, constater cette propriété dans l'acide sulfurique, et le mercure la possède très-peu.

Froid produit par l'évaporation. — Comme toute vapeur absorbe de la chaleur en se formant, toute évaporation est une cause de refroidissement. Conséquemment un thermomètre à boule mouillée se refroidira dans l'air jusqu'à ce que la chaleur perdue par l'évaporation soit égale à la chaleur rendue par les causes extérieures.

La chaleur perdue est proportionnelle à la quantité de vapeur qui se forme, ou à $\frac{BS}{H}(F' - f)$, F' étant la force élastique maximum à la température t' du thermomètre mouillé; la chaleur rendue est proportionnelle à un coefficient M, à la surface S du thermomètre et à son abaissement de température $t - t'$; donc

$$MS(t - t') = \frac{BS}{H}(F' - f),$$

ou, en remplaçant $\frac{B}{M}$ par un coefficient A,

$$(2) \qquad t - t' = \frac{A}{H}(F' - f).$$

Nous verrons bientôt le parti qu'on a tiré de cette formule.

Évaporation dans un espace limité. — Dans un vase rempli de gaz les choses vont évidemment se passer autrement. L'évaporation commen-

cera comme à l'air libre; mais peu à peu le degré d'humidité augmentant dans le gaz, l'évaporation diminue; elle devient nulle quand $f = F$, c'est-à-dire quand la vapeur a pris sa force élastique maximum. Ces prévisions de la formule ont été vérifiées par Dalton. Il faisait usage d'un ballon de verre (*fig.* 190) qui contenait la cuvette M d'un baromètre AM et dans lequel on pouvait faire le vide ou introduire des gaz par un tube C. Il y faisait entrer ensuite un excès de liquide par un entonnoir à robinet B. Le liquide se vaporisait, et la pression intérieure augmentait d'une quantité qui était toujours égale à la tension maximum de la vapeur dans le vide, à la même température.

Fig. 191.

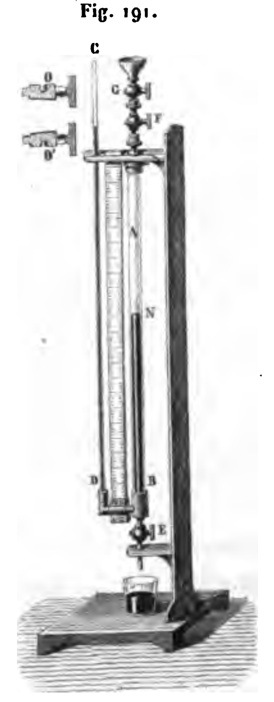
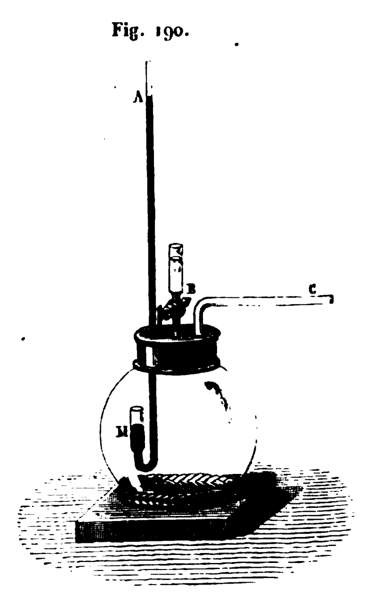


Fig. 190.



Gay-Lussac a vérifié ce résultat par un appareil mieux conçu (*fig.* 191). AB et CD sont les deux branches d'un manomètre à air libre; la première est fermée en F par une douille de fer à robinet. On y visse un entonnoir muni d'un second robinet G dont la clef n'est pas percée, mais seulement creusée d'une capsule (O et O'); celle-ci reçoit le liquide et le verse dans le ballon quand on retourne le robinet. Supposons qu'on ait introduit dans cet appareil de l'air sec à la pression atmosphérique jusqu'en N, et qu'ensuite on y fasse pénétrer par le robinet G quelques gouttes de liquide;

on verra le mercure baisser dans AB et monter dans CD, et bientôt la pression devenir stationnaire. Alors, on ramènera le niveau au point N en versant du mercure par CD, l'air reprendra le volume et la pression qu'il avait primitivement, et l'élévation du niveau dans CD représentera la force élastique de la vapeur formée. Gay-Lussac trouva qu'elle était égale à celle qu'on observerait dans le vide.

M. Regnault recommença les mêmes études avec une grande précision, et trouva qu'en général la force élastique maximum de la vapeur d'eau dans les gaz est un peu plus faible que dans le vide, mais que la différence est trop petite pour qu'on ait à en tenir compte. Voici la Table des tensions qu'il a observées.

Table des tensions de la vapeur d'eau dans les gaz.

°	m	°	m	°	m	°	m
−10,0	2,078	+0,0	4,600	+10,0	9,165	+20,0	17,391
9,5	2,168	0,5	4,767	10,5	9,474	20,5	17,935
9,0	2,261	1,0	4,940	11,0	9,792	21,0	18,495
8,5	2,356	1,5	5,118	11,5	10,120	21,5	19,069
8,0	2,456	2,0	5,302	12,0	10,457	22,0	19,659
7,5	2,561	2,5	5,491	12,5	10,804	22,5	20,265
7,0	2,666	3,0	5,687	13,0	11,162	23,0	20,288
6,5	2,776	3,5	5,889	13,5	11,530	23,5	21,528
6,0	2,890	4,0	6,097	14,0	11,908	24,0	22,184
5,5	3,010	4,5	6,313	14,5	12,298	24,5	22,858
5,0	3,131	5,0	6,534	15,0	12,692	25,0	23,550
4,5	3,257	5,5	6,763	15,5	13,112	25,5	24,261
4,0	3,387	6,0	6,998	16,0	13,536	26,0	24,988
3,5	3,522	6,5	7,242	16,5	13,972	26,5	25,738
3,0	3,662	7,0	7,492	17,0	14,421	27,0	26,505
2,5	3,807	7,5	7,751	17,5	14,882	27,5	27,294
2,0	3,955	8,0	8,017	18,0	15,357	28,0	28,101
1,5	4,109	8,5	8,291	18,5	15,845	28,5	28,931
1,0	4,267	9,0	8,574	19,0	16,346	29,0	29,782
0,5	4,430	9,5	8,805	19,5	16,861	29,5	30,654
"	"	"	"	"	"	30,00	31,548

Loi du mélange des gaz et des vapeurs. — En voyant ce résultat, on a admis qu'il se forme dans les gaz une quantité de vapeur égale en *poids* à celle qui prendrait naissance dans le même espace s'il était vide, et qu'elle se mêle purement et simplement au gaz, sans aucune condensation, en ajoutant sa pression à celle du gaz. Non-seulement on admet cette loi quand

les vapeurs sont à leur maximum, mais on l'étend aussi au cas où elles auraient une pression moindre, et l'on dit :

Les gaz et les vapeurs en se mêlant entre eux prennent une tension égale à la somme de celles qu'ils auraient individuellement dans le même espace.

Loi de Mariotte appliquée au mélange des gaz et des vapeurs. — Nous avons admis que les vapeurs suivent sensiblement la loi de Mariotte et se dilatent avec le coefficient 0,00366. Dès lors, quand on changera la température t, la pression f et le volume v d'une masse donnée de vapeur, on aura les relations

$$\frac{vf}{1+at} = \frac{v'f'}{1+at'}, \quad f' = \frac{v}{v'}\frac{1+at'}{1+at}f.$$

Toutefois cette formule n'est applicable que dans les cas où la valeur calculée de f' est inférieure ou égale à la tension maximum de la vapeur à la température t'. Si la formule donnait une valeur plus grande, cela indiquerait qu'une portion de la vapeur se serait condensée en prenant la température t' et le volume v'.

Il en est de même d'un mélange de gaz et de vapeurs. Soient v, H, t, f les données dans un premier état du gaz, v', H', t', f' les mêmes quantités dans un deuxième état; on aura, pour l'air seul,

$$\frac{v(H-f)}{1+at} = \frac{v'(H'-f')}{1+at'}, \quad f' = H' - \frac{v}{v'}\frac{1+at'}{1+at}(H-f).$$

Il peut arriver que f' soit plus petit que la tension maximum de la vapeur à t' degrés, ou bien qu'elle lui soit égale; dans ces deux cas le problème sera possible; mais si f' dépasse la limite du maximum de tension, la relation précédente ne s'appliquera pas. Ces formules permettent de résoudre un grand nombre de problèmes sur les vapeurs ou sur les mélanges de gaz et de vapeurs.

Poids de l'air humide. — Dans l'atmosphère, quand la pression est H, il y a toujours de la vapeur d'eau à une tension f, et la pression de l'air sec est H — f. Le poids d'un litre de cet air est

$$\alpha = 1^{gr},293187\frac{H-f}{(1+at)760};$$

celui de la vapeur d'eau, dont la densité est $\frac{5}{8}$, sera

$$\alpha' = \frac{5}{8}\times 1^{gr},293187\frac{f}{(1+at)760};$$

la somme, c'est-à-dire le poids d'un litre d'air atmosphérique humide, est

$$\alpha_1 = 1^{gr},293187 \frac{H - \frac{3}{8}f}{(1 + at)760}.$$

VII. — COMMENT SE FORMENT LES VAPEURS : 2° PAR ÉBULLITION.

L'ébullition est un cas particulier de l'évaporation. Supposons que la température du liquide croisse progressivement, la force élastique augmentera rapidement, deviendra égale ou supérieure à H, et la formule de Dalton (1) montre que la quantité d'eau évaporée approchera d'un maximum : l'expérience prouve que cela est vrai. Elle prouve en outre que l'évaporation change de caractère et qu'il se fait, dans le liquide, un mouvement tumultueux produit par des bulles de vapeur qui naissent au fond du vase, grossissent en montant et crèvent à la surface. C'est l'*ébullition*. On voit que l'ébullition commence nécessairement aussitôt que la force élastique de la vapeur devient égale à la pression extérieure. De cette loi générale, déjà énoncée p. 188, on tire les conséquences suivantes.

I. L'ébullition commence pour l'eau à 100 degrés, pour l'alcool à 80 et pour les divers liquides à des températures déterminées et fixes : c'est la première loi de l'ébullition.

Tableau de quelques points d'ébullition.

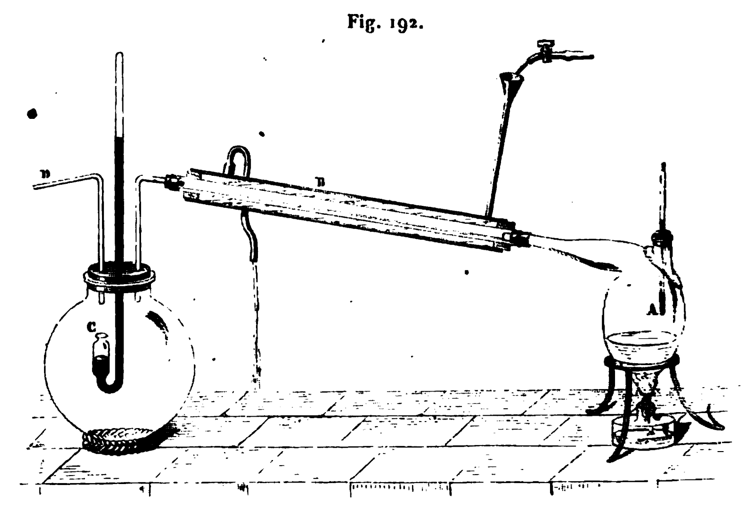
Acide sulfureux	—10°	Eau	100°
Éther chlorhydrique	11	Essence de térébenthine	157
Acide sulfurique anhydre	25	Phosphore	290
Sulfure de carbone	48	Huile de lin	316
Éther formique	56	Acide sulfurique	325
Alcool	80	Mercure	360
Acide azotique concentré	86	Soufre	400

II. Toute formation de vapeur entraîne une destruction de chaleur. Si donc un liquide est placé sur un foyer, la chaleur qu'il en reçoit tend à élever sa température ; mais sa vaporisation tend à l'abaisser jusqu'à la limite du point d'ébullition ; cette température reste donc constante pendant toute la durée de l'action : c'est la deuxième loi de l'ébullition.

III. Si la pression augmente, il faut que la force élastique croisse et que le point d'ébullition s'élève ; si elle diminue, il faut qu'il s'abaisse. On va démontrer cette conséquence par des expériences précises. Une cornue tubulée contenant de l'eau et munie d'un thermomètre A communique avec un tube entouré d'un réfrigérant B et avec un ballon dans lequel plonge un

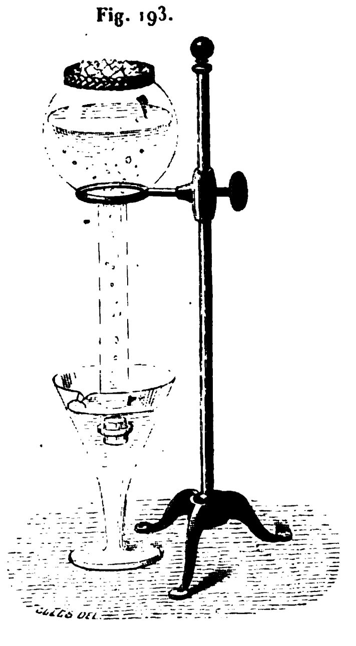
baromètre C (*fig.* 192). Un tube D permet de faire un vide partiel dans

Fig. 192.



l'appareil ou d'y comprimer l'air. On trouve alors que l'eau bout :

Fig. 193.



Aux températures :	Sous les pressions :
0°	5mm
20	17
50	53
60	144
100	760
110	1075
130	2030

On peut encore démontrer la variation du point d'ébullition par une expérience beaucoup plus simple. On fait bouillir de l'eau dans un ballon à long col, assez longtemps pour que les vapeurs puissent balayer l'air que contient l'appareil; puis, après l'avoir bouché, on le retourne dans un vase plein d'eau (*fig.* 193). De cette façon, l'eau ne subira d'autre pression que celle de la vapeur qui lui est superposée; elle cessera de bouillir, et peu à peu elle se refroidira. Si alors on

vient à placer des fragments de glace sur le sommet du ballon, on condensera la vapeur, on diminuera la pression, et l'on verra l'ébullition se reproduire à toute température.

Marmite de Papin. — Comme conséquence de ces faits, il sera possible d'élever la température de l'eau au-dessus de 100 degrés, et en général de tous les liquides au-dessus de leur point d'ébullition, si on les enferme dans des vases résistants. La marmite de Papin réalise ce résultat. Elle se compose d'un cylindre de laiton très-épais, fermé par un couvercle qui s'applique sur les bords au moyen d'une forte vis de pression (*fig.* 194).

Fig. 194.



Ce couvercle est percé d'un petit trou A par où la vapeur pourrait s'échapper si un levier de sûreté CBP ne fermait son orifice. Quand on chauffe l'eau, la vapeur se forme peu à peu, et sa pression augmente jusqu'à faire équilibre à l'effort exercé par le levier de sûreté. A partir de ce moment, la pression n'augmente plus; chaque fois qu'elle tend à s'élever, la vapeur soulève la soupape et s'échappe. Alors l'ébullition se fait régulièrement à une température constante et d'autant plus haute que le levier est plus chargé. Quand on enlève brusquement cette soupape, un jet de vapeur s'échappe bruyamment dans l'air et on peut impunément plonger la main dans le jet, que l'on trouve d'abord à une température très-basse, mais qui s'échauffe progressivement jusqu'à 100 degrés, à mesure qu'il se ralentit. La température de la chaudière, qui était de 120 ou 130 degrés, baisse très-rapidement jusqu'à 100 degrés. Ces deux faits nous montrent que la vapeur en se formant et en se dilatant absorbe de la chaleur, puisqu'elle se refroidit en s'échappant et qu'elle refroidit également la chaudière.

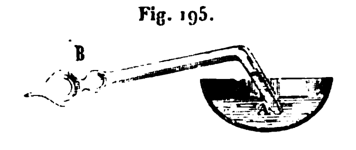
Variations anormales du point d'ébullition. — Le point d'ébullition éprouve de légères oscillations qui dépendent de la matière du vase. Dans

un métal, l'ébullition de l'eau se fait d'une manière régulière et continue. les bulles de vapeur qui naissent en tous les points de la paroi sont très-petites ; elles se succèdent sans interruption et la température est de 100 degrès. Dans un ballon de verre elles se produisent spécialement en quelques points qui sont toujours les mêmes ; elles sont plus grosses et moins rapprochées, et enfin la température est de 101 degrés. L'ébullition de l'acide sulfurique dans le verre est tout à fait discontinue.

M. Marcet a montré qu'en vernissant l'intérieur d'un ballon de verre avec de la gomme laque ou du soufre, l'ébullition se fait à 99°,7. Au contraire, quand on commence par laver un vase de verre avec de l'acide sulfurique et qu'ensuite on le rince avec soin, il acquiert la propriété de retarder de 5 à 6 degrés l'ébullition de l'eau.

M. Donny introduisit de l'eau dans un tube à boule B (*fig.* 195), bien nettoyé à l'intérieur, et qu'il ferma à la lampe après avoir expulsé l'air par une ébullition prolongée. L'eau étant refroidie et maintenue dans la branche A, fut chauffée, dans un bain de glycérine, jusqu'à la température de 137 degrés sans qu'il y eût autre chose qu'une évaporation active sans ébullition. Mais à 137 degrés, la colonne liquide se rompit brusquement : une partie fut projetée dans les boules B qu'elle brisa.

Fig. 195.



M. Dufour a fait l'expérience suivante, très-instructive pour la théorie de l'ébullition. Un mélange d'huile de lin et d'essence de girofle en proportions telles, que la densité moyenne soit celle de l'eau vers 100 degrés, est échauffé uniformément jusqu'à 120 degrés. Alors on y fait tomber une goutte d'eau qui, plus lourde, va au fond, s'y réduit en vapeur et en gouttelettes qui remontent dans l'huile et s'y maintiennent en équilibre, non-seulement à des températures inférieures à 100 degrés, mais encore au delà de 178 degrés, sans qu'il y ait ébullition. Mais en touchant ces globules, suspendus au sein de l'huile, avec une tige de métal ou de bois, M. Dufour a vu l'ébullition se produire immédiatement entre 110 et 130 degrés.

On a conclu de ces expériences que l'ébullition commence toujours en certains points de la paroi qui retiennent une petite quantité d'air ; que là se fait une évaporation rapide qui donne naissance à une bulle. L'évaporation se continue et s'exagère à la surface intérieure de cette bulle à mesure qu'elle monte, et finalement l'ébullition semble n'être qu'une évaporation rapide à la surface de contact du liquide avec un gaz ou avec sa propre vapeur.

Phénomènes produits dans les vases très-chauds. — I. Toutes les fois qu'on échauffe une capsule métallique jusqu'à une température très-élevée et qu'on y projette quelques gouttes d'eau avec une pipette, elles n'entrent point en ébullition : on les voit se réunir en un globule qui est sphérique s'il y a peu d'eau, et qui est de plus en plus aplati quand on en met davantage.

Fig. 196.



L'expérience se fait ordinairement avec un éolipyle BB (*fig*, 196). Il s'échauffe au moyen d'une lampe CE et projette par le tube BD un jet de vapeur d'alcool qui s'enflamme et qui est capable d'échaufler jusqu'au rouge la capsule A que l'on place au-dessus.

II. Toutes les substances connues se comportent comme l'eau, quelle que soit leur volatilité. L'acide sulfureux et l'acide carbonique liquides persistent eux-mêmes, sans bouillir, au milieu de creusets qu'on peut porter au rouge blanc. Mais s'il n'y a pas d'ébullition, il y a toujours une évaporation, comme on peut s'en convaincre en remarquant que les acides sulfurique et azotique répandent des fumées blanches et l'iode des vapeurs violettes, que l'alcool et l'éther se maintiennent entourés de flammes, et que le globule diminue peu à peu de grosseur jusqu'à disparaître. Si ce globule est étalé sur toute l'étendue d'une capsule plate, on voit des bulles de vapeur se former au-dessous de lui et le crever en s'échappant; s'il est petit, ces vapeurs le chassent et le promènent en divers sens. Quand il est d'une grosseur moyenne, il demeure fixe; mais il éprouve des mouvements vibratoires qui changent périodiquement sa forme, et l'œil, qui saisit seulement l'enveloppe de ses contours successifs, lui attribue la figure d'un polygone étoilé. Tout cela prouve une abondante formation de vapeurs dans l'espace qui sépare la substance liquide du métal échauffé, et cette évaporation est d'autant plus rapide que la température est plus élevée.

III. Pour que ces expériences réussissent, il faut que la capsule atteigne ou dépasse une certaine limite de température. Pour le démontrer, on chauffe la capsule au rouge, on y verse de l'eau qui prend la forme sphéroïdale, et l'on éteint la lampe, afin de laisser refroidir l'appareil. Le globule se maintient pendant ce refroidissement jusqu'au moment où la capsule arrive à 140 degrés; alors il éclate brusquement et l'ébullition se fait avec

une extrême rapidité. Cette température limite du vase est variable pour les divers liquides et baisse avec leur point d'ébullition. Elle est de 140 degrés pour l'eau, de 134 degrés pour l'alcool et de 61 degrés pour l'éther.

IV. Dans ces phénomènes, le liquide ne mouille pas le vase; car l'expérience réussit avec une capsule percée de trous ou avec une toile métallique aussi bien qu'avec un vase continu. A cette preuve M. Boutigny a encore ajouté l'expérience suivante. Après avoir chauffé jusqu'au rouge une masse de cuivre suspendue à un fil métallique, il la plonge subitement dans un vase de verre contenant de l'eau à 99 degrés environ; il n'y a point d'ébullition, et l'on voit distinctement une enveloppe gazeuse entre le métal et le liquide. Cela persiste tant que la sphère n'est pas refroidie jusqu'à 140 degrés; mais aussitôt qu'elle arrive à ce point, le contact s'établit et l'ébullition se fait tout à coup avec une explosion si vive, que le vase est souvent brisé.

V. La température des sphéroïdes liquides a été mesurée de différentes manières. M. Berger a obtenu des globules d'eau pesant plus d'une livre, et il y a plongé commodément un thermomètre qui marqua de 96 à 98 degrés au fond du globule, à une distance de 2 millimètres de la surface de la capsule, mais qui s'abaissa jusqu'à 90 degrés à la surface supérieure.

VI. On peut expliquer aisément ces phénomènes. En effet, on sait, d'après M. Wolf, que l'ascension de l'eau dans les tubes capillaires diminue peu à peu, devient nulle et se change en dépression, si la température augmente progressivement jusqu'à l'ébullition. D'où il résulte que le ménisque terminal, d'abord concave, devient ensuite convexe, comme pour le mercure; conséquemment, que les liquides cessent de mouiller les vases quand ils sont suffisamment échauffés et doivent prendre la forme sphéroïdale.

Pour rendre compte de l'évaporation sans ébullition, il faut remarquer que la chaleur du creuset ne peut se transmettre au globule par conductibilité, puisqu'il n'y a point de contact entre ces deux corps. Elle lui arrive par rayonnement, et dès lors une partie s'y transmet sans l'échauffer, une autre s'y réfléchit, et enfin une dernière portion échauffe la surface du globule qui touche au creuset. Là se fait une évaporation très-rapide qui agite le globule et une absorption de chaleur latente assez considérable pour maintenir la goutte à une température un peu plus faible que celle de l'ébullition. On voit que ces phénomènes n'ont rien de mystérieux.

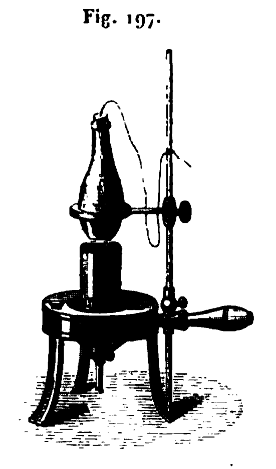
Connaissant la loi des températures des liquides à l'état globulaire, M. Boutigny fut naturellement conduit à une des plus belles expériences de la Physique. Il verse dans un creuset de platine rougi une certaine

quantité d'acide sulfureux liquide, qui s'y conserve à une température inférieure à celle de son ébullition, c'est-à-dire inférieure à — 10 degrés ; puis il y introduit de l'eau qui à l'instant même se congèle. M. Faraday, remplaçant l'acide sulfureux par l'acide carbonique solide et l'eau par le mercure, congela ce métal de la même manière au milieu d'une capsule chauffée au rouge blanc.

Une autre conséquence non moins curieuse découle des mêmes principes. Après avoir mouillé sa main avec de l'éther, on peut là plonger dans du plomb fondu et n'éprouver qu'une sensation de froid. On peut même, sans courir aucun danger, passer le doigt à travers un jet de fonte de fer ou le tremper dans un bain d'argent en fusion, pourvu qu'on l'ait préservé en le mouillant avec de l'acide sulfureux, et à la condition de ne pas prolonger l'immersion au delà du temps nécessaire pour l'évaporation de ce liquide.

Quand une chaudière à vapeur a été alimentée pendant longtemps avec de l'eau ordinaire ou de l'eau de mer et que tous les sels calcaires ont déposé à l'intérieur une couche terreuse épaisse et peu conductrice de la chaleur, les parois métalliques doivent être chauffées presque jusqu'au rouge pour que la vapeur puisse se former ; et si le dépôt vient à se briser, l'eau se trouve en contact avec du fer suréchauffé. Quand cela survient, les phénomènes que nous venons d'étudier se produisent, la formation de la vapeur diminue, mais un danger d'explosion est imminent ; car lorsque la chaudière se refroidira jusqu'à 140 degrés, une ébullition instantanée se développera, et avec une telle énergie, que les issues de sûreté deviendront insuffisantes.

Fig. 197.



On imite cet effet avec une petite chaudière (*fig.* 197) qu'on échauffe au rouge, dans laquelle on verse de l'eau, qu'on ferme avec un bouchon, et qu'on laisse ensuite refroidir. Au bout d'un moment l'ébullition se fait et le bouchon saute.

CHAPITRE VI.

APPLICATIONS AUX PHÉNOMÈNES NATURELS ET A L'INDUSTRIE.

I. — L'HYGROMÉTRIE.

En contact perpétuel avec l'eau, l'air atmosphérique est nécessairement chargé de vapeurs d'eau. Le problème de l'hygrométrie consiste à mesurer la proportion de cette vapeur. On peut le considérer à trois points de vue différents :

1° On peut chercher la force élastique f de la vapeur atmosphérique;

2° On peut se demander quel est le poids π de vapeur contenue dans v litres d'air : ce poids est représenté par la formule

$$\pi = \frac{5}{8}(1,293)\frac{vf}{(1+at)760} = \frac{4}{5}\frac{vf}{(1+at)760};$$

cette deuxième recherche revient à la première, car on pourra déduire π de f, et réciproquement;

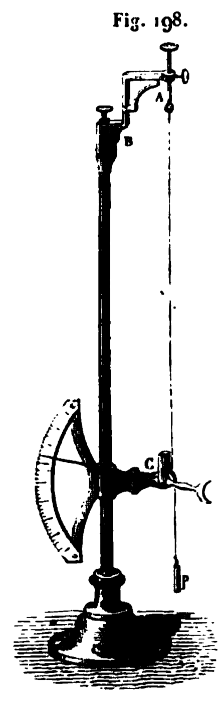
3° On peut chercher le rapport $\frac{f}{F}$ de la force élastique actuelle à la force maximum à la même température : c'est l'*état hygrométrique* ou la *fraction de saturation* de l'air; $\frac{f}{F}$ est, d'ailleurs, égal au rapport $\frac{\pi}{\Pi}$ du poids de vapeur π contenu dans un litre d'air au poids Π que cet air contiendrait s'il était saturé, car ces deux poids sont respectivement proportionnels à f et à F.

Les Tables de tensions de la vapeur d'eau donnant F pour toutes les températures (p. 211), on pourra calculer $\frac{f}{F}$ après avoir mesuré f ou π, et réciproquement. Il s'ensuit que toutes les questions d'hygrométrie pourront être résolues par la détermination de l'une des trois quantités f, π ou $\frac{f}{F}$; or il y a trois méthodes expérimentales qui y conduisent.

Hygromètre de Saussure. — Il y a des substances que l'on nomme *hygrométriques*, parce qu'elles absorbent dans l'air l'humidité qui s'y trouve. Presque toutes les matières animales ou végétales séchées possèdent cette propriété; en outre, elles augmentent de volume lorsqu'elles se chargent d'eau. Ainsi, le bois, les fanons de baleine, les cordes à boyau, se gonflent perpendiculairement au sens de leurs fibres, et les cheveux, que l'on peut considérer comme formés d'une suite de cônes emboîtés, s'allongent ou se raccourcissent suivant qu'ils sont placés dans l'air humide ou sec. Ces changements de volume, étant exclusivement produits par l'humidité, peuvent servir à la mesurer.

Saussure prend une mèche de cheveux longs, lisses et soyeux, coupés sur une tête vivante et saine, et les dégraisse en les faisant bouillir pendant trente minutes dans une lessive contenant $\frac{1}{10}$ de carbonate de soude. Il fixe un de ces cheveux à un support de laiton A (*fig.* 198), l'enroule sur une poulie C et le termine par un poids p d'environ $0^{gr},2$. La poulie porte une aiguille qui parcourt un limbe divisé et qui accuse les variations de l'état hygrométrique; elle monte quand il pleut et descend quand il fait sec.

Fig. 198.



Pour graduer identiquement tous les hygromètres, on les couvre d'abord avec une cloche pleine d'air que l'on dessèche en y introduisant une plaque de tôle revêtue d'un vernis fondu de carbonate de potasse. On voit l'appareil se fixer en un point invariable qui indique la sécheresse absolue et que l'on marque zéro. On place ensuite la cloche sur une assiette pleine d'eau; l'air se sature, le cheveu s'allonge et l'aiguille s'arrête à une autre position qui correspond à l'humidité extrême; on y marque 100 degrés, et on divise en 100 parties égales l'intervalle compris entre les deux points fixes.

Abandonné maintenant dans l'air, cet instrument indique des *degrés* d'humidité variables; c'est un hygroscope, mais il ne résout aucun des problèmes que nous avons proposés précédemment. Saussure le sentit, et il commença des expériences pour chercher quel est l'état hygrométrique qui correspond à chaque degré de la division empirique. Après lui, cette question fut reprise par Dulong, Gay-Lussac et Melloni, mais ce n'est qu'après les expériences de M. Regnault que l'on connut complétement toutes les circon-

stances qui influent sur l'hygromètre. M. Regnault commença par préparer des solutions titrées d'acide sulfurique :

$$SO^3 + 2HO, \quad SO^3 + 3HO, \ldots,$$

Il en introduisit ensuite une petite quantité dans un baromètre à vapeur : les forces élastiques de la vapeur produite étaient données par la dépression du mercure : elles furent d'autant moindres que la solution était plus concentrée ; M. Regnault les mesura, et, opérant absolument comme il l'avait fait précédemment pour l'eau pure, il dressa les Tables de ces forces élastiques entre les températures de 5 et 35 degrés.

Après ces recherches préliminaires, il verse au fond d'un grand bocal de verre une couche peu épaisse de l'une des solutions précédentes ; il suspend au-dessus l'hygromètre et un thermomètre, et, après avoir fermé le vase par un plateau de verre rodé, il attend que l'hygromètre s'arrête à une division fixe du limbe. Soient a cette division et t la température. On cherche dans les Tables les tensions f et F, données à t degrés par la solution et par l'eau pure, et le quotient $\frac{f}{F}$ exprime l'état hygrométrique qui correspond à la division a marquée sur l'échelle de Saussure. On répète ensuite la même opération avec toutes les solutions préparées, ce qui donne autant de points de correspondance que l'on a fait d'épreuves. Par interpolation, on dresse enfin une Table qui fait connaître les états hygrométriques pour chaque degré du limbe divisé. Voici un exemple de cette graduation.

$\frac{f}{F}$	Hygromètre.
0,000	0,0
0,021	2,4
0,092	14,2
0,189	35,5
0,356	58,5
0,541	76,8
0,671	87,3
0,778	93,4
1,000	100,0

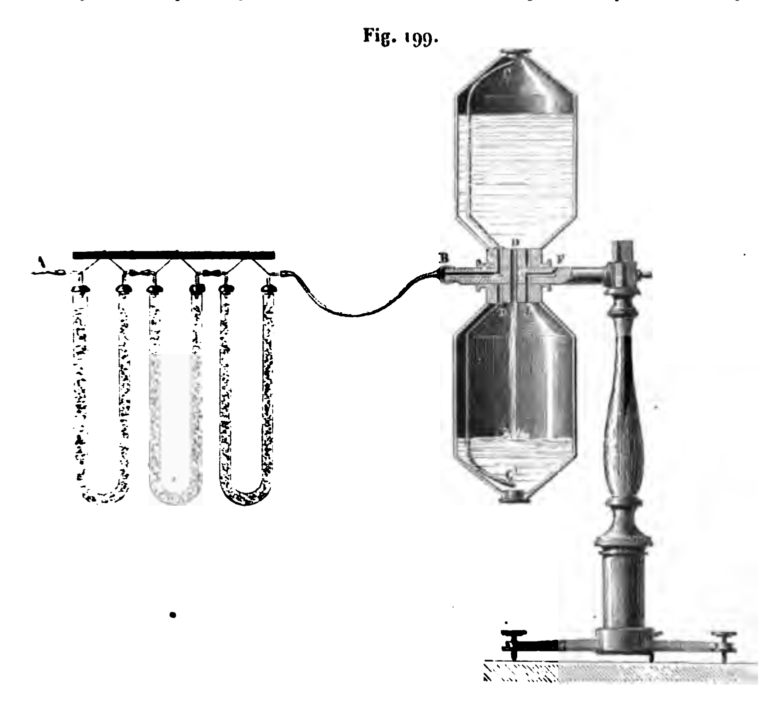
Malheureusement, M. Regnault reconnut que la Table construite pour un cheveu ne peut s'appliquer à un autre, ce qui enlève à cet instrument toute sa simplicité.

Méthode chimique. — M. Brunner a imaginé de déterminer directement par une véritable analyse chimique le poids d'eau renfermé dans un volume déterminé v d'air. Cette méthode ne laisse rien à désirer sous le

rapport de l'exactitude, mais elle exige des opérations longues et délicates.

Un tube de caoutchouc fixé en A (*fig.* 199) va chercher l'air dans l'atmosphère au point que l'on veut étudier, et un aspirateur plein d'eau qui

Fig. 199.



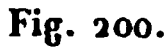
s'écoule lentement, provoque un courant d'air qui traverse trois tubes pleins de ponce sulfurique. Le gaz dépose la presque totalité de sa vapeur dans le premier tube et achève de se dessécher dans le second; le troisième est destiné à empêcher l'humidité de l'aspirateur de revenir en sens inverse du courant gazeux, pour se dissoudre dans la pierre ponce. On a pesé les deux premiers avant l'opération, on les pèse de nouveau quand elle est terminée, et l'augmentation qu'ils ont éprouvée est le poids de la vapeur. On a, d'après la formule (2)

$$\pi = \frac{4}{5}\frac{vf}{(1+at)760}.$$

Les aspirateurs que l'on emploie aujourd'hui permettent de continuer l'opération pendant très-longtemps. Ils sont composés de deux réservoirs

placés l'un au-dessus de l'autre et qui tournent à frottement autour d'un axe horizontal BF. L'air est aspiré par le tube ABC, il arrive en C au-dessus du niveau de l'eau et la remplace dans le réservoir DC, pendant qu'elle s'écoule par le conduit DD. En même temps le vase inférieur s'emplit et l'air s'en échappe par un autre tube EF. Quand tout le liquide est tombé, on retourne les deux réservoirs autour de l'axe EF, et comme ils sont construits d'une manière identique, ils ne font que changer de rôle en changeant de place.

Méthode du psychromètre. — Plaçons l'un auprès de l'autre (*fig.* 200) sur une même planchette deux thermomètres B et C, bien concordants et très sensibles. Enveloppons le réservoir du second avec une étoffe de gaze toujours humectée avec de l'eau qu'elle reçoit d'un réservoir A, par l'intermédiaire d'une mèche de coton. Cet instrument est le psychromètre. Nous avons déjà dit que la différence $t - t'$ entre les thermomètres sec et mouillé s'exprime par la formule (2) de la page 209 :


Fig. 200.



$$t - t' = \frac{A}{H}(F' - f),$$

qui donne

$$f = F' - \frac{H}{A}(t - t').$$

Si donc on a déterminé préalablement la constante A, on pourra mesurer $t - t'$ et H, chercher dans les Tables la tension maximum F' qui correspond à t', et calculer la valeur de la tension actuelle f de la vapeur atmosphérique.

Pour déterminer la valeur du coefficient A qui convient au lieu dans lequel on veut placer le psychromètre, on fera par la méthode chimique plusieurs expériences qui donneront la valeur exacte de f. En même temps on observera t et t' au psychromètre, et en remplaçant ces quantités f, t et t' dans la formule, on calculera A. Ce coefficient est à peu près constant pour un même lieu, mais il varie sensiblement quand

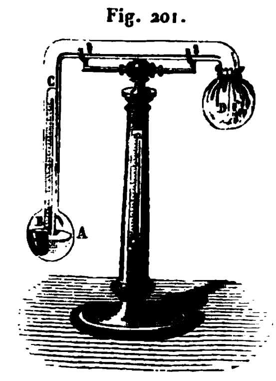
l'appareil change de place. On peut approximativement écrire $\frac{1}{A} = 0{,}0007$, ce qui donne

$$f = F' - 0{,}0007\,(t - t')\,H.$$

Hygromètres à condensation. — Le Roy, de Montpellier, a proposé le premier de refroidir dans l'air un vase plein d'eau en y jetant successivement de petits morceaux de glace, jusqu'au moment où un dépôt de rosée commence à se former sur sa surface. Si la rosée se forme à t', c'est qu'à cette température l'air commence à être sursaturé et que la force élastique f de la vapeur qu'il contient est un peu plus grande que la tension maximum F' qui correspond à t'. On laisse ensuite réchauffer le vase peu à peu, et bientôt la rosée disparaît à la température t''; à cet instant l'air cesse d'être saturé, puisque l'eau condensée reprend l'état gazeux, et la force élastique f est inférieure à la tension maximum F'' qui correspond à t''; f se trouve ainsi comprise entre F' et F'' : en moyenne elle est égale à $\frac{F' + F''}{2}$.

Tel est le principe des hygromètres condenseurs. Pour le réaliser, Daniell place sur un support (*fig.* 201) un siphon de verre fermé, purgé d'air et contenant de l'éther en A. Il est terminé par deux boules : la première D qui est couverte d'une gaze; la deuxième A, qui est nue, et dans laquelle est fixé un thermomètre très-sensible BC. On verse quelques gouttes d'éther sur la gaze qui recouvre D; elles s'évaporent rapidement et refroidissent la boule D. D'après le principe de la paroi froide, il se produit une distillation du liquide intérieur de A vers D, une absorption de chaleur latente en A, un refroidissement du thermomètre BC et bientôt un dépôt de rosée sur la boule A. L'observateur se place à une petite distance, de manière à voir se réfléchir l'image du ciel sur la surface du verre en B; il reconnaît le moment où la rosée se forme, au voile qui s'étend sur le point brillant et à une diminution brusque dans l'intensité de la lumière réfléchie; il note alors la température : c'est t'. En cessant de verser de l'éther sur D, cette température se relève, et quand la rosée disparaît, le thermomètre marque t''.

Fig. 201.



Cet appareil offre encore quelques inconvénients, que M. Regnault évite par la disposition suivante.

Un tube de verre E (*fig.* 202), terminé par un dé d'argent très-mince et parfaitement poli, contient de l'éther. Le bouchon qui le ferme donne accès, d'abord à un tube B qui plonge dans le liquide, ensuite à un autre tube A qui affleure au bouchon et qui communique avec un aspirateur, enfin à un thermomètre qui indique la température intérieure. Quand l'aspirateur marche, un courant d'air circule dans l'éther, y produit une évaporation et un refroidissement, et bientôt la rosée se dépose sur le dé d'argent. On remarquera : 1° que cette manipulation tout intérieure ne change pas l'état de l'air ambiant ; 2° que le dé d'argent très-mince et très-conducteur est à la même température sur ses deux faces ; 3° que le liquide agité constamment est au même degré dans tous ses points, et que le thermomètre indique nécessairement la température de l'air qui enveloppe la surface du dé ; 4° enfin qu'en réglant convenablement le jeu de l'aspirateur on peut produire un refroidissement rapide ou lent, à volonté, et s'arrêter précisément au moment où le voile de rosée se forme.

Fig. 202.



Pour saisir avec précision le moment où la rosée se dépose, on établit en F un second dé semblable au premier, mais dans lequel on ne met pas d'éther. L'observateur se place à 10 mètres environ, avec une lunette à colonne qui vise les deux tubes à la fois, il suit la marche des thermomètres et constate le dépôt de rosée par la différence d'éclat des deux dés. A ce moment, on ferme le robinet et on lit la température t'. L'appareil se réchauffe ensuite, et après un temps très-court la surface réfléchissante redevenant claire, on note t'' qui est très-sensiblement égale à t'.

La méthode des hygromètres à condensation est sans contredit préférable à toutes les autres.

Rosée. — Les météores aqueux sont, en général, très-compliqués ; un seul est simple, c'est la rosée. Après le coucher du soleil, la terre se refroidit et rayonne vers les espaces célestes. Si le ciel est couvert, les nuages lui renvoient ce qu'elle perd ; il en est de même si elle est abritée par des ar-

bres, des hangars, des toiles, etc. Si le ciel est serein et découvert, elle ne reçoit rien en échange de ce qu'elle envoie et se refroidit. Well ayant placé un thermomètre dans l'herbe le vit baisser de 2,3,... et même de 5 degrés. On conçoit que les corps légers, mauvais conducteurs et doués d'un grand pouvoir émissif, sont ceux qui se refroidissent le plus.

L'air qui touche ces corps prend leur température, et si le refroidissement est suffisant, il atteint son maximum de saturation et la rosée se dépose. Elle ne se produit pas sous les arbres, les hangars, les abris quelconques, puisque là il n'y a pas de refroidissement; elle ne se dépose pas pendant les temps couverts par la même raison, ni pendant l'été parce que le refroidissement terrestre est insuffisant; mais elle est abondante au printemps et en automne, et elle est proportionnelle à l'étendue de ciel visible du point où est situé l'objet considéré.

Sereins, Brouillards. — Le serein et le brouillard sont dus au refroidissement de l'air; le premier est produit par des gouttes de pluie qui tombent sans nuages, le deuxième par une condensation en particules assez ténues pour ne pas tomber, car la résistance que l'air oppose à la chute des particules déliées est une fraction de leur poids d'autant plus considérable qu'elles sont moindres. Les nuages sont des brouillards plus élevés; ils marquent généralement la limite entre des couches inférieures chaudes et non saturées et une nappe supérieure froide. La pluie qui provient d'une condensation plus abondante occasionne toujours un refroidissement.

II. — MOUVEMENTS DE L'ATMOSPHÈRE ET DES MERS.

Il n'y a pas de mécanisme plus simple que celui qui règle la circulation générale de l'atmosphère. Tout vient du soleil; les pôles ne sont point échauffés, et les diverses contrées le sont d'autant plus que leur latitude est moindre. On a tracé sur le globe terrestre : 1° des lignes qui indiquent de degré en degré les températures moyennes de l'année, *lignes isothermes;* 2° des lignes de température égale d'été, *isothères;* 3° des lignes de même température d'hiver, ou *isochimènes*. Elles ne sont point parallèles. Les températures d'été sont très-hautes, celles d'hiver sont très-basses au centre des continents, par exemple en Russie et en Chine : ce sont des climats extrêmes. Au contraire, les oscillations sont moindres dans les îles, parce que l'évaporation de l'eau rafraîchit l'air en été et que la mer, qui se refroidit à peine en hiver, tient l'air à une température voisine de la sienne.

Il y a toujours une zone qui reçoit le soleil d'aplomb, c'est comme un

foyer annulaire; c'est là que l'air est le plus chaud et le plus léger; dès lors il s'élève et entoure le globe d'un anneau de gaz ascendant. C'est l'*anneau d'aspiration*.

Il ne peut y avoir d'aspiration sans appel d'air. Au nord et au sud de l'anneau on constate des vents qui viennent du nord et du sud pour se rejoindre et s'élever : ce sont les *alizés*. Arrivés aux limites supérieures de leur course ascendante, ils se séparent en deux courants équatoriaux qui s'élancent vers les pôles, passent au-dessus des contrées tempérées où descendent sur la terre qu'ils échauffent en se refroidissant et retournent vers l'équateur pour recommencer le même trajet indéfiniment.

Dans notre hémisphère les alizés ne viennent pas directement du nord au sud, mais du nord-est au sud-ouest. En effet, l'atmosphère partage le mouvement terrestre et décrit, de l'ouest à l'est, des cercles d'autant plus grands que la latitude est moindre. Un vent qui part de Paris du nord au sud possède une vitesse vers l'est de 280 lieues à l'heure; en marchant il passe au-dessus de points ayant une vitesse plus grande, et il retarde sur eux. il se dirige vers l'Espagne, les Canaries et le Mexique : c'est un vent de nord-est. Arrivé à l'équateur, il s'élève en hauteur et continue sa route vers l'ouest, même quand il commence à marcher vers le nord pour former le courant équatorial; mais finalement, il prend une vitesse du sud-ouest au nord-est, par suite du décroissement de la vitesse de rotation des points qu'il traverse à des latitudes croissantes.

L'existence de ces deux courants superposés de direction contraire a été constatée par les ascensions exécutées au pic de Ténériffe et par des projections de cendres provenant des volcans de l'Amérique centrale.

Le calcul indique que, si rien ne tempérait leur marche, ces deux courants atteindraient une vitesse dix fois supérieure aux ouragans les plus violents. C'est en se mêlant qu'ils se modèrent. Sous la zone torride, dans l'hémisphère boréal, les alizés soufflent éternellement du sud-ouest, et le courant équatorial supérieur ne se mêle point à eux; mais, à mesure qu'il converge vers le nord, ce courant se rétrécit et envoie vers le sol des *remous descendants* qui se mêlent aux vents alizés. Les deux vitesses de signe contraire tendent à s'annuler ou oscillent entre les directions des deux courants. Sous le 35e degré la compensation paraît complète, plus haut vers le nord les vents de retour dominent de l'ouest vers l'est.

Ces mouvements généraux de l'air distribuent la pluie. Sous les vents alizés l'air vient du nord; il est froid, il s'échauffe progressivement en marchant; son état hygrométrique baisse, il est sec et desséchant; pas de pluie, les arbres perdent leurs feuilles. Dans l'anneau d'aspiration l'air se dilate, s'élève, se refroidit et dépasse le point de saturation. Dès lors il

pleut, un vide se fait et le baromètre baisse. Comme cet anneau suit le soleil, il est en été sur le Mexique, en hiver sur Sainte-Hélène et passe deux fois l'équateur en un an. Les pluies qu'il apporte sont considérables, elles dépassent 4 mètres de hauteur et peuvent atteindre 15 mètres.

L'air qui finalement s'est élevé dans cette zone est chaud et saturé, il se dilate en montant, ce qui le refroidit; mais quand il repassera à sa pression primitive, il reprendra sa température et se retrouvera saturé : on conçoit qu'il transporte avec lui vers le nord et vers le sud de la chaleur et de l'humidité quand il descend vers le sol par les remous descendants. Si le baromètre baisse en un point, ces remous seront considérables, le vent aura la direction du courant équatorial; il viendra du sud-ouest, et le mélange des deux courants abandonnera de la pluie. Cette pluie fait un vide, la dérivation continue et entretient le mauvais temps. Que la pression augmente au contraire, le remous sera faible, c'est le courant polaire qui dominera; le vent sera du nord-est; il fera beau.

A ces causes générales s'ajoutent des actions secondaires, par exemple la configuration du globe. Les côtes occidentales de l'Europe, qui reçoivent le premier choc des vents d'ouest, sont très-pluvieuses. On cite Berghen en Norvége, Brest en France, Coimbre (*collis imbrium*) en Portugal. Les montagnes dépouillent l'air de son humidité : l'alizé qui descend de l'Europe et de l'Asie et qui franchit les grandes chaines, balaye, en les desséchant, cette longue suite de déserts qui commence au désert de Gobi et ne se termine qu'au Sahara, à peine interrompue par l'oasis d'Égypte.

Gulf-Stream. — Les mêmes causes produisent leurs effets sur les eaux. Les vents alizés poussent les flots de l'Atlantique des deux côtés de l'anneau d'aspiration vers la côte américaine, du cap Vert à la pointe San-Roque. En cet endroit le continent américain pousse dans l'Océan une pointe triangulaire qui partage le courant en deux rameaux; l'un se dirige vers le cap Horn, l'autre, le Gulf-Stream, monte vers le nord, absorbe la rivière des Amazones, détache une branche ascendante en avant des Antilles pendant que le gros du mouvement suit toutes les sinuosités du golfe du Mexique; puis se serrant entre Cuba et la Floride, il franchit la passe de Bahama et tourne au nord. C'est là qu'il est le plus étroit et le plus rapide; ses eaux sont bleues comme les lacs de montagnes, plus salées que dans le reste de l'Océan à cause de l'évaporation qu'elles ont subie; plus chaudes aussi, variant de 26 à 30 degrés à la surface, et de 20 à 25 vers 900 mètres de profondeur. A cet endroit, le courant rallie la branche qui avait passé à l'est des Antilles et laissant entre lui et l'Amérique un remous d'eau froide, il atteint Terre-Neuve et court à l'est. Alors il se ralentit, s'épa-

nouit et se divise comme pour distribuer la chaleur qu'il apporte. Une partie longe la Suède et redescend vers les côtes d'Angleterre, de France et d'Espagne. Les mêmes choses se répètent dans le grand Océan au nord et au sud.

Cyclones. Typhons. — On a longtemps ignoré les conditions des ouragans qui dévastent parfois les Antilles ou les mers de l'Inde. On sait aujourd'hui que ce sont des tourbillons. Dans notre hémisphère, ils naissent sur le bord septentrional du Gulf-Stream par des causes peu connues; ils ont alors peu d'étendue. Souvent ils croissent jusqu'à mesurer un diamètre de 60 à 600 lieues. Ils se dirigent vers les Antilles avec une vitesse de propagation qui ne dépasse pas 10 à 15 lieues; ils décrivent une courbe très-régulière, se retournent vers le nord, puis peu à peu s'infléchissent vers l'ouest. Dans notre hémisphère, le mouvement tournant est toujours dirigé en sens inverse des aiguilles d'une montre. C'est le contraire dans l'hémisphère austral. Au centre, la pression barométrique est très-faible; elle peut descendre jusqu'à 660 millimètres, et il n'y a point de vent; mais tout autour de ce point le vent tournant se produit avec une vitesse qui atteint 50 lieues à l'heure et qui équivaut à une pression de 300 kilogrammes par mètre carré. Rien ne résiste à de si puissantes actions. Toutefois, comme le cyclone se meut du sud au nord, la vitesse de sa translation se combine avec celle du mouvement tournant, toutes deux sont concordantes sur la rive droite, qui est le *bord dangereux;* elles sont contraires à gauche, où est le *bord maniable.*

L'attention une fois appelée sur ces circonstances, les observatoires de l'Europe ont installé des centres météorologiques en divers points du globe, et Fitz-Roy, en Angleterre, M. Marié Davy, en France, ont reconnu que très-communément des cyclones, plus ou moins offensifs, traversent l'Europe. Ils l'abordent par la côte occidentale, soit par la Suède, soit par l'Angleterre, soit même par l'Espagne, s'élèvent vers le nord et redescendent par l'Asie pour retourner vers l'équateur. Il est possible de constater l'arrivée de ces phénomènes et de prévenir à temps les contrées qu'ils doivent traverser. C'est la seule prévision du temps qui soit aujourd'hui admissible.

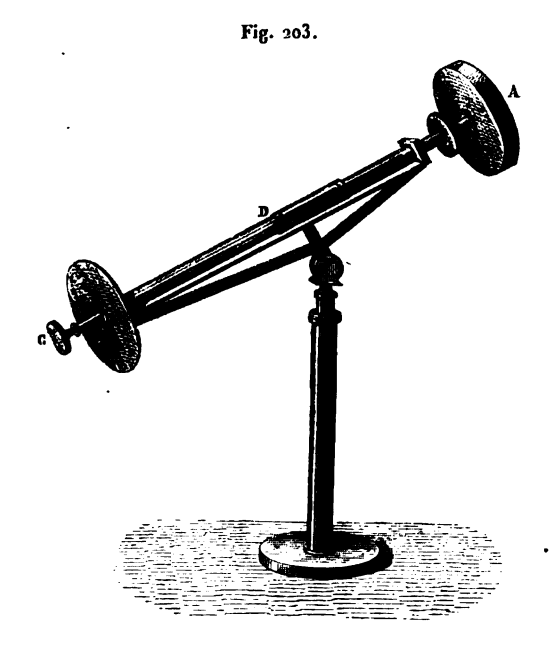
III. — LE SOLEIL.

Le principe de la chaleur, par conséquent de toute force et de toute vie, réside dans le soleil. Nous allons mesurer ce que cet astre nous envoie.

Mesure de la chaleur solaire. — Après quelques essais tentés par Saussure et Herschel, Pouillet a mesuré approximativement la quantité de

chaleur envoyée par le soleil à l'aide d'instruments qu'il a nommés *pyrhéliomètres :* la *fig.* 203 en représente un.

Fig. 203.



Le pyrhéliomètre se compose d'un vase cylindrique plat AT dont la base antérieure A, de surface S, est couverte de noir de fumée pour absorber la totalité des rayons solaires, et qui est argenté et poli sur les autres parties de sa surface qui doivent rayonner le moins possible. Il est rempli d'eau distillée et il constitue un calorimètre équivalent à un poids total d'eau P. Il reçoit le réservoir d'un thermomètre TD, et tout l'appareil peut tourner autour de l'axe CT, afin de mêler les couches d'eau.

Supposons que l'eau soit à la température de l'atmosphère à l'ombre, et qu'à un moment donné on expose l'instrument au soleil pendant cinq minutes, il éprouvera un réchauffement t, la chaleur absorbée sera Pt, et elle serait égale à $\frac{Pt}{5S}$, pendant une minute et sur un centimètre carré.

Désignons par A la quantité de chaleur que le soleil enverrait pendant une minute sur 1 centimètre carré de surface placé à la limite supérieure de l'atmosphère. En traversant l'air pour arriver jusqu'au sol, cette chaleur est absorbée en proportion d'autant plus grande, que la couche atmo-

sphérique est plus épaisse. Elle serait $A\alpha$ après avoir traversé une épaisseur égale à l'unité, $A\alpha\alpha$ ou $A\alpha^2$, après une épaisseur double, et $A\alpha^e$ si la couche était égale à e. Pour vérifier cette formule, on a fait, avec le pyrhéliomètre, des observations suivies pendant toute une journée sereine, et on a déterminé les chaleurs c, c', c'',... versées pendant une minute sur 1 centimètre carré, lorsque les épaisseurs atmosphériques traversées par les rayons solaires étaient e, e', e'',..., en prenant pour unité l'épaisseur normale de l'air. Ces quantités devaient satisfaire aux relations

$$c = A\alpha^e, \quad c' = A\alpha^{e'}, \quad c'' = A\alpha^{e''}, \ldots,$$

ou aux suivantes

$$\frac{c}{c'} = \alpha^{e-e'}, \quad \frac{c}{c''} = \alpha^{e-e''}, \ldots,$$

qui ont permis de calculer α. Cette quantité a été trouvée constante pour un même jour, ce qui justifie la formule adoptée; mais elle varie d'un jour à l'autre entre 0,7244 et 0,7888. On voit par là qu'un rayon solaire venu du zénith perd un quart de sa chaleur par l'absorption atmosphérique.

La chaleur reçue à la surface du sol étant $c = A\alpha^e$, et α étant déterminé, on peut calculer A, que l'on trouve constant et égal à $1^c,7633$. Cela veut dire que si l'atmosphère n'existait pas, 1 centimètre carré de la surface terrestre recevrait 1,7633 calories pendant une minute. Pour avoir la somme de chaleur que la terre reçoit en 1 minute, il faut multiplier 1,7633 par la section du faisceau cylindrique qui enveloppe le globe, c'est-à-dire par le quart de sa surface S, ce qui donne pour une année

$$1,7633 \times \frac{S}{4} \times 60 \times 24 \times 365 = 231\,684.S \text{ calories}.$$

On trouve que cette chaleur serait suffisante pour fondre une couche de glace qui envelopperait la terre et aurait $30^m,89$ d'épaisseur. Si maintenant on décrit une sphère concentrique au soleil avec le rayon de l'orbite terrestre, le soleil enverrait sur cette sphère une quantité de chaleur capable de fondre en une année une épaisseur de glace égale à 4 ($30^m,89$); et si toute cette glace était transportée sur le globe du soleil, elle y formerait une couche d'épaisseur égale à 1447 lieues. Le soleil peut donc fondre en une année une couche de glace qui l'envelopperait et qui aurait 1447 lieues d'épaisseur.

Hypothèses sur la chaleur solaire. — Il faut maintenant se demander quelle est l'origine de cet immense développement de chaleur et de force. On s'est contenté pendant longtemps de dire que le soleil est un corps chaud ayant, de longue date, une provision de chaleur qu'il dépense lentement, et qui est si grande, qu'elle ne paraît pas avoir diminué depuis les

temps historiques. Cette hypothèse ne résiste pas à une discussion sérieuse. En supposant que le soleil ait la plus grande chaleur spécifique connue, celle de l'eau, et une conductibilité parfaite, il se serait refroidi de 8 300 degrés depuis cinq mille ans. On ne fait pas une théorie plus satisfaisante en disant que le soleil est un foyer de matières en combustion. S'il était composé de houille brûlante, il se serait éteint après cinq siècles. Il faut que le soleil se renouvelle perpétuellement.

Le créateur de la thermodynamique, J.-R. Mayer, admet que les étoiles filantes et toutes les matières cosmiques de la lumière zodiacale tombent sur le soleil. Ces corpuscules y arrivent avec la vitesse V déterminée par l'attraction, vitesse qui se détruit tout à coup, comme celle d'un projectile sur la plaque de tir : d'où une destruction de force vive égale à $\frac{1}{2} m V^2$ et une production de chaleur égale à $\frac{1}{2} m V^2 \times \frac{1}{430}$. Or on peut, connaissant les lois de l'attraction, connaître V, et l'on trouve que ces corpuscules produisent autant de chaleur que quatre mille fois leur poids de houille brûlant dans l'oxygène. Si donc il en tombe une assez grande quantité, ils pourront maintenir l'incandescence solaire. Le calcul a montré que le soleil en devrait recevoir une couche de 20 mètres par année. Il faudrait quatre siècles pour que le diamètre apparent de l'astre parût augmenté de $\frac{1}{10}$ de seconde. Mais la vitesse de rotation du soleil diminuerait d'une heure en cinquante-trois ans. Or, depuis l'origine du monde, cette vitesse aurait dû être détruite, ce qui n'est pas.

Les planètes éprouvent dans l'espace des résistances qui diminuent leur distance au soleil; elles s'en rapprochent et finiront par y tomber, alors toute leur vitesse détruite réchauffera le soleil. M. Thomson a calculé que si cette chute se réalisait, la consommation du soleil serait assurée pour quatre-vingt-quatre ans par la chute de Vénus, pour quatre-vingt-quinze par la Terre et pour trente-deux mille deux cent-quarante par Jupiter. Mais il n'est pas probable que ce soit à des actions pareilles qu'on doive recourir.

M. Faye propose une autre hypothèse qui exige quelques développements. Vue au télescope, la surface solaire paraît striée, elle a des facules, puis des taches sombres qui sont des trous creusés dans sa masse, obscurs au centre et éclairés sur leurs pentes. On suppose que le soleil est formé d'un noyau sombre qui se voit au centre des taches, entouré d'une première couche déjà lumineuse qui forme les déclivités des trous, et terminé par une enveloppe très-éclairée, la *photosphère*. Au-dessus de tout cela on voit pendant les éclipses des nuages roses qu'on nomme *protubérances* et qui s'étendent régulièrement tout autour de la surface. La photosphère est gazeuse, tout au moins liquide, car la durée de révolution des taches est de plus en plus grande depuis l'équateur jusqu'aux pôles.

Il est donc certain que la masse entière du soleil est constituée par des couches différentes, et que c'est la surface seule qui rayonne.

Or M. Faye suppose que la masse totale est due à la condensation d'une matière cosmique qui s'est accumulée de toute part, et qui, par sa concentration, par la perte de sa force vive, a développé une épouvantable quantité de chaleur et une température hors de comparaison avec celle que nous pouvons constater. A ces températures il n'y a point d'affinité chimique, et tous les éléments sont dissociés. Mais à la surface, à cause du rayonnement, la température baisse jusqu'à 5000 ou 6000 degrés, et les affinités commencent à agir. Alors il se fait des actions chimiques, la matière se constitue, rayonne, et la photosphère prend sa lumière. Puis cette matière, attirée par le centre, s'enfonce dans la masse, y retrouve la température de dissociation et se détruit; mais elle est remplacée par d'autres matériaux qui continuent le même effet. On voit que nous en sommes encore à faire des hypothèses pour expliquer le soleil.

Les rayons solaires, arrivant sur le globe, évaporent les eaux en leur cédant ce qui est nécessaire de chaleur latente $P\lambda$ pour les amener à l'état liquide. Ces vapeurs s'élèvent dans l'air à une hauteur h. Il faut pour cela un travail Ph, ce qui fait en tout une dépense de chaleur $P\left(\lambda + \frac{h}{430}\right)$. Transportées par les vents sur le continent, ces vapeurs se condensent et reproduisent d'abord la chaleur $P\lambda$ qu'elles rendent au sol, puis elles tombent de h', ce qui rend $\frac{Ph'}{430}$. Il reste encore une quantité disponible $\frac{P(h'-h)}{430}$ qui correspond à l'altitude $h'-h$ du lieu où la pluie est tombée. Cette eau entre dans les rivières et les fleuves, retourne à la mer, et, chemin faisant, met en liberté la quantité de chaleur $\frac{P(h'-h)}{430}$. A elle seule la chute du Rhin libère 3600 unités de chaleur et échauffe ses eaux de 0,01 degré.

C'est encore la chaleur solaire qui détermine les mouvements de l'air. Quand nous empruntons de la force au vent, aux cours d'eau, nous la prenons donc à la source qui anime le globe, au soleil.

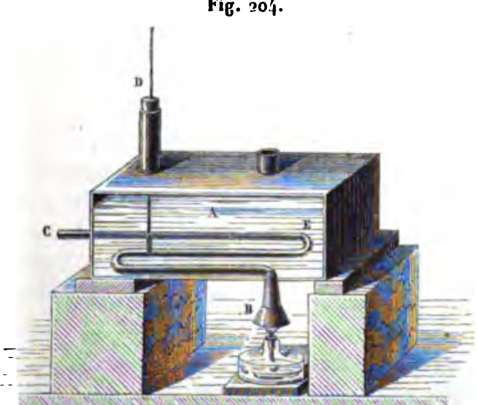
IV. — LE TRAVAIL CHIMIQUE.

Les molécules des différents corps ont une vitesse. Mises en présence, il arrive souvent qu'elles se précipitent l'une contre l'autre et se joignent,

c'est la *combinaison*. Dans cet acte elles perdent une partie de leur force vive comme deux corps qui se choquent, et à cette perte correspond une production de chaleur C; le travail perdu par l'action chimique est C × 430 : il faut le mesurer.

Expériences de Lavoisier et Rumford. — Lavoisier chercha le premier à mesurer la chaleur dégagée pendant les actions chimiques et en particulier pendant la combustion de l'hydrogène et du charbon; il faisait brûler un poids connu de ces substances dans son calorimètre et mesurait la chaleur libérée par la quantité de glace fondue; mais les nombres qu'il obtint sont trop faibles.

Fig. 204.

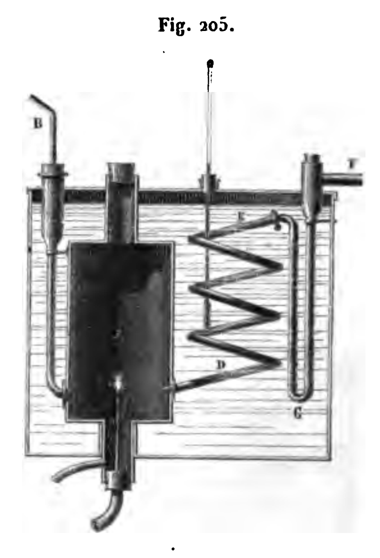


Rumford reprit ces mesures avec un calorimètre spécial (*fig.* 204) composé d'une caisse de cuivre mince pleine d'eau et contenant un large serpentin BEC dont les deux extrémités étaient ouvertes dans l'air. Il plaçait sous la première B, qui était évasée, le foyer qu'il voulait étudier, et les produits de la combustion, entraînant avec eux la chaleur dégagée, circulaient dans l'intérieur et sortaient par C après avoir pris la température de l'eau. Il employait la méthode de compensation et calculait, par la formule ordinaire, la chaleur cédée au calorimètre par un poids donné du combustible. Comme l'appareil ne recevait pas toute la chaleur développée par la combustion, les résultats devaient être et furent en effet trop faibles.

Expériences de Despretz et de Dulong. — Despretz perfectionna l'appareil de Rumford. Il faisait brûler le combustible dans un creuset de platine qui recevait un courant continuel d'oxygène et d'où les produits formés s'échappaient par un serpentin. Tout le système plongeait entièrement

dans un calorimètre plein d'eau qui mesurait la totalité de la chaleur dé-veloppée. A peu près à la même époque, Dulong s'occupa du même sujet en faisant usage d'un appareil tout semblable (*fig.* 205). Enfin, MM. Favre et Silbermann ont perfectionné la méthode, et ils ont obtenu des résultats très-exacts. Voici les chaleurs de combustion de quelques corps, c'est-à-dire les nombres de calories produites par 1 kilogramme de ces substances :

Fig. 205.



Chaleurs de combustion.

Hydrogène..................	34 462
Gaz des marais.............	13 350
Gaz oléfiant................	12 203
Essence de térébenthine.....	11 576
Huile d'olive...............	9 862
Éther sulfurique............	9 431
Charbon de bois............	8 080
Graphite naturel............	7 797
Diamant....................	7 770
Alcool absolu...............	6 962
Oxyde de carbone..........	2 490
Soufre natif................	2 262

Action du soleil sur les plantes. — Un médecin genevois, Charles Bonnet, remarqua, vers le milieu du XVIIIe siècle, que les feuilles exposées au soleil dégagent un gaz par leur face inférieure. Priestley reconnut que les plantes rendent sa pureté primitive à l'air vicié par la respiration. Ingenhousz prouva que cette épuration se fait par les parties vertes sous la condition expresse d'être illuminées par le soleil. Enfin Sennebier vit que tout se réduit à une décomposition de l'acide carbonique par les plantes, qui gardent le charbon et rendent l'oxygène. A la prendre en gros, cette fonction est une action réductrice, l'inverse de la combustion; elle absorbe toute la chaleur que cette combustion produirait. C'est un travail exécuté avec perte de la force vive ou de la chaleur envoyée par le soleil.

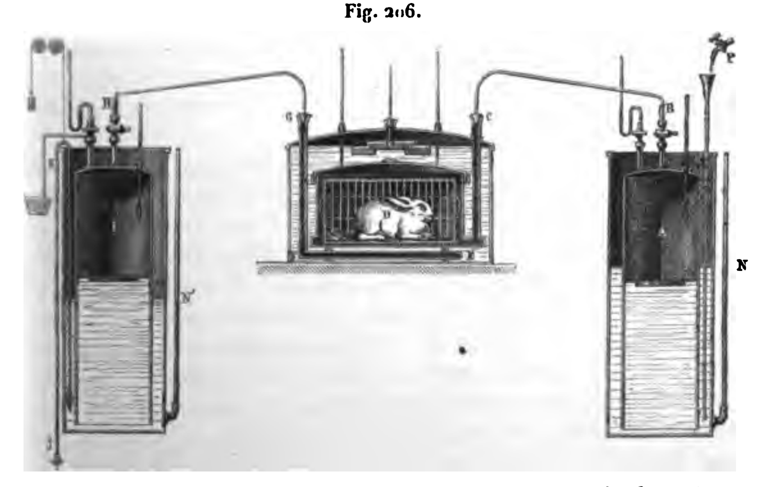
Mais par contre, lorsque nous brûlons le bois ou la houille, nous refaisons l'acide carbonique et nous libérons toute cette chaleur autrefois empruntée au soleil.

V. — LA CHALEUR ANIMALE.

On sait que Lavoisier, assimilant en tout la respiration à la combustion, admit que les matériaux du sang sont brûlés soit dans les poumons, soit dans l'ensemble des vaisseaux circulatoires, et qu'ils y développent la quantité de chaleur que leur carbone et leur hydrogène produiraient en se combinant directement avec l'oxygène. Pour vérifier cette théorie, Lavoisier prit deux cochons d'Inde de même poids et sensiblement identiques, plaça l'un dans une cloche dont on renouvelait l'air, et l'autre dans le calorimètre à glace. Ces deux animaux ayant demeuré en expérience pendant dix heures, le premier avait brûlé 3gr,333 de charbon, ce qui aurait produit, si ce carbone avait été libre, assez de chaleur pour fondre 326gr,75 de glace; le second en avait fondu réellement 407gr,27; mais comme il s'était refroidi, Lavoisier estima qu'il fallait réduire ce nombre à 341 grammes. Il en conclut que la chaleur développée par un animal est sensiblement égale à celle que l'on produirait en brûlant dans l'oxygène la quantité de charbon que cet animal transforme en acide carbonique.

On peut faire à cette expérience deux objections : la première, que les deux animaux comparés n'étaient point identiques; la deuxième, qu'il n'a pas été tenu compte de l'hydrogène brûlé. C'est pour lever ces objections que Despretz et Dulong reprirent les expériences de Lavoisier à peu près

Fig. 206.



en même temps et avec des appareils presque identiques; la *fig.* 206 représente celui de Dulong. Un animal était placé en D dans une caisse en-

tourée d'eau qui faisait fonction de calorimètre. Un courant d'air pur fourni par un gazomètre A traversait la caisse et se recueillait dans un deuxième gazomètre I. On pouvait conséquemment mesurer la quantité d'oxygène absorbée et celle d'acide carbonique produite. On retranchait de cet oxygène total celui que l'acide carbonique contenait, et l'on admit que la différence exprimait l'oxygène employé à brûler l'hydrogène et à faire de l'eau

On calcula ensuite les chaleurs qui seraient produites si l'on formait par combustion vive les mêmes quantités d'acide carbonique et d'eau avec du charbon et de l'hydrogène libres; on en fit la somme, et on la compara à la chaleur réellement produite par l'animal. Le rapport de la première à la dernière de ces quantités est en moyenne égal à 0,906 d'après Dulong et à 0,923 d'après Despretz.

Dans ces résultats, on néglige toutes les actions chimiques de la digestion; on ne tient aucun compte du froid qui se produit par l'évaporation ou par le dégagement de l'azote; on admet que tout l'oxygène qui ne se retrouve pas dans l'acide carbonique a été employé à former de l'eau, ce qui ne peut être vrai; on suppose que les principes du sang qui sont brûlés développent une quantité de chaleur égale à celle que leur carbone et leur hydrogène produiraient s'ils étaient libres. A cela près, on peut considérer la théorie de Lavoisier comme étant justifiée par l'expérience.

De la force animale. — Jules-Robert Mayer énonça en 1865 un principe aussi fécond que celui de Lavoisier : c'est que tout animal est une machine thermique et que tous ses mouvements sont une transformation en force de la chaleur de combustion; que s'il fait du travail extérieur, c'est à la condition de perdre une quantité équivalente de chaleur. L'expérience a confirmé cette conception.

M. Béclard, en appliquant un thermomètre sur les muscles du bras, reconnut que la chaleur dégagée par la contraction musculaire diminue toutes les fois que cette contraction effectue un travail extérieur. M. Hirn plaça un homme dans une guérite de sapin où était une roue à palettes animée par un moteur extérieur. Cet homme pouvait : 1° demeurer immobile; 2° monter sur les palettes et effectuer un travail d'ascension; 3° descendre les palettes pendant qu'elles montaient et dégager ainsi de la force. Cet homme tenait dans sa bouche deux tubes; il aspirait de l'air par l'un, il expirait par l'autre de l'acide carbonique qu'on jaugeait; enfin il dégageait une quantité de chaleur qu'on appréciait par l'échauffement de la guérite où il était enfermé. Les expériences ont prouvé : 1° qu'au repos le patient consomme 30 grammes d'oxygène par minute et produit 150 calories; 2° qu'en montant, sa respiration s'active et consomme 150 grammes d'oxygène,

cinq fois autant que pendant le repos; mais que la chaleur n'est pas cinq fois plus grande: et qu'il y a donc eu par minute 45 calories perdues, employées à produire à la fois le travail de l'ascension et le travail des muscles; 3° que le patient, quand il descend les palettes, consomme moins d'oxygène et produit proportionnellement plus de chaleur.

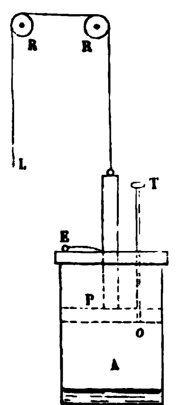
Les animaux herbivores ou carnivores se nourrissent de végétaux de première ou de seconde main. Cette nourriture est brûlée dans les poumons, se transforme en acide carbonique et en eau qui repassent dans l'atmosphère, et en matières azotées qui se répandent sur le sol. La chaleur de cette combustion est perdue par rayonnement ou employée au travail de la locomotion du transport des fardeaux, etc. Ainsi les animaux consument, produisent et utilisent la chaleur et la force.

Les végétaux agissent inversement et rétablissent l'équilibre atmosphérique; ils purifient l'air, reproduisent de la matière organique et des combustibles, et demandent au soleil la chaleur ou la force que les animaux régénèrent et distribuent.

VI. — LES MOTEURS A FEU.

Machine à vapeur. — Denis Papin est le premier qui ait songé à utiliser la force élastique de la vapeur pour faire mouvoir des machines. Voici l'appareil qu'il proposa dans ce but en 1690.

Fig. 207.



Dans un cylindre A (*fig.* 207) se meut un piston P suspendu à une corde L qui va s'enrouler sur deux poulies R, R; au fond du cylindre se trouve une petite quantité d'eau. On commence par abaisser le piston jusqu'au niveau du liquide; l'air qui se trouve au-dessous s'échappe par une petite ouverture *o* que l'on bouche ensuite par la tige T. Ensuite, on apporte du feu sous l'appareil, l'eau se vaporise, et la vapeur soulève le piston jusqu'au bout de sa course. Là on l'arrête par un cliquet E qui s'enfonce dans la tige; on enlève le feu, la vapeur se refroidit et se condense, le vide se fait au-dessous du piston, et, si on retire le cliquet qui le retient, la pression atmosphérique le précipite au fond du cylindre. Il suffit alors d'attacher un poids

à la corde L pour le faire soulever à une hauteur égale à la descente du piston.

Les imperfections de cet appareil l'empêchèrent de recevoir une application pratique. Papin lui-même abandonna bientôt le principe sur lequel il était basé, et chercha à tirer parti de la pression de la vapeur en la faisant agir de haut en bas sur un piston qui chassait une colonne d'eau dans un tube recourbé verticalement. En sortant du tube, l'eau retombait sur les augets d'une roue hydraulique qu'elle mettait ainsi en mouvement. Papin fit construire un bateau qui devait marcher au moyen de cette machine, et il en essaya l'effet sur la rivière de la Fulda; mais son appareil fut détruit par les bateliers de Munden.

A la même époque, le capitaine Savery imagina une machine destinée à l'élévation des eaux. Dans cette machine, l'eau est d'abord aspirée par un tube vertical qui plonge dans un puits, dans lequel le vide se fait par la condensation de la vapeur qui le remplit; ensuite, on ferme une soupape et on chasse cette eau dans un second tube recourbé de bas en haut, en faisant agir sur elle la pression de la vapeur développée dans une chaudière.

Mais la première machine à vapeur dont l'industrie ait fait usage est celle de Newcomen et Cowley, basée sur le même principe que l'appareil primitif de Papin, et connue sous le nom de *machine atmosphérique*. Une chaudière remplie d'eau produit un jet de vapeur qui s'engage dans un cylindre vertical et soulève un piston attaché à l'une des extrémités d'un balancier, dont l'autre extrémité, lestée d'un poids considérable, soutient la tige d'une pompe. Cette tige s'abaisse pendant que le piston s'élève. Quand ce dernier est arrivé en haut de sa course, on ferme un robinet qui intercepte la communication avec la chaudière, on condense la vapeur par une injection d'eau froide, et la pression atmosphérique fait descendre le piston, qui entraîne le balancier et fait remonter la tige de la pompe. On obtint de cette manière un mouvement de va-et-vient, que l'on rendit plus tard automatique, en chargeant le balancier de fermer et d'ouvrir les robinets de communication et d'injection.

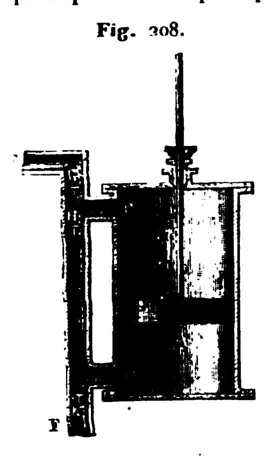
Machine de Watt. — En étudiant la machine atmosphérique, James Watt reconnut qu'elle était susceptible de recevoir d'importants perfectionnements. Il inventa d'abord le *condenseur* séparé, qui sert à éviter le refroidissement nuisible du corps de pompe. Après avoir produit son effet mécanique, la vapeur passe du cylindre dans un réservoir séparé, où elle est condensée par des aspersions d'eau froide.

Ensuite, Watt abandonna l'emploi de la pression atmosphérique pour

abaissement du piston; il y substitua l'action plus énergique de la vapeur, qu'il fit agir de haut en bas, et il fit remonter le piston par l'action d'un poids, en donnant accès à la vapeur sur ses deux faces.

Voici la disposition adoptée par Watt, pour sa *machine à simple effet*, qui repose sur ces principes. Le piston P (*fig.* 208) se meut dans le cylindre A, qui communique par les ouvertures C, D avec le tuyau EF. La vapeur arrive de la chaudière en E et passe à travers la soupape d'admission G, dans la partie supérieure du cylindre où elle agit sur le piston. La soupape d'équilibre H est fermée à ce moment, et la soupape d'exhaustion K est ouverte, afin de laisser échapper la vapeur qui s'était rendue précédemment sous le piston; cette vapeur est chassée par le tuyau F dans le condenseur. Quand le piston est arrivé au fond du cylindre, on ferme les soupapes G et K, et l'on ouvre H; la vapeur qui est au-dessus du piston peut alors se répandre uniformément dans tout l'espace A, le piston est également pressé sur ses deux faces, et il remonte sans difficulté sous l'action du poids qu'il avait soulevé par sa descente. Alors on ouvre de nouveau les soupapes G et K et on ferme H; la vapeur arrive encore de la chaudière et fait descendre le piston qui chasse la vapeur inférieure dans le condenseur, et ainsi de suite.

Fig. 208.

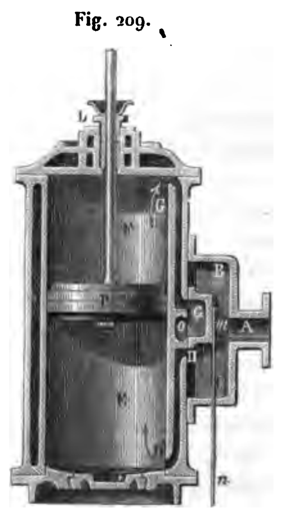


La machine à simple effet est encore employée aujourd'hui à l'épuisement des mines. Elle comporte plusieurs accessoires qui ne sont pas indiqués dans notre figure : une pompe aspirante, destinée à extraire du condenseur l'eau et une partie de l'air qui s'en dégage; une pompe qui alimente la chaudière; le parallélogramme articulé qui rattache au balancier la tige du piston principal et celles des pompes, et qui leur permet de se mouvoir verticalement et en ligne droite, malgré le mouvement circulaire de l'extrémité du balancier, etc. Ces mécanismes sont représentés dans la *fig.* 210, qui est une coupe de la machine à double effet.

La machine de Watt *à double effet* est celle qui s'emploie aujourd'hui d'une manière générale. La vapeur y agit symétriquement et alternativement sur les deux faces du piston, qu'elle soulève et abaisse tour à tour par sa pression. Dans cette nouvelle machine, quand la vapeur s'engage sous la tête du piston, une communication s'établit entre le haut du cylindre et le condenseur, et quand le piston est arrivé au haut de sa course, le condenseur communique avec le bas du cylindre, pendant que de nouvelle

vapeur arrive au-dessus du piston pour le faire descendre. Le mouvement de la machine se divise ainsi en deux temps identiques, et elle peut produire un travail continu, par exemple faire tourner un arbre moteur.

Fig. 209.



La distribution de la vapeur est réglée par un mécanisme spécial, le *tiroir* (*fig.* 209). La vapeur qui arrive de la chaudière par le tube A, se rend d'abord dans la boîte B, d'où partent deux conduits DD, GG, qui la dirigent soit au-dessus, soit au-dessous du piston. La glissière *m*, commandée par la tige *n*, ouvre tour à tour l'un de ces conduits pendant qu'elle fait communiquer l'autre avec la cavité O, d'où part un tuyau qui va au condenseur. Le conduit qui se trouve ouvert (par exemple DD) donne accès à la vapeur qui pénètre dans le cylindre, pendant que celle qui se trouve de l'autre côté du piston s'échappe par le conduit GG et l'ouverture O pour se rendre au condenseur. La tige *n* est mise en mouvement par la machine elle-même.

La *fig.* 210 représente une machine de Watt à double effet. Le piston P se meut dans le cylindre EF, qui reçoit la vapeur par le tube A. Dans ce tube se voit une valve qui, par les articulations *zy*, communique avec le *régulateur à force centrifuge* XXY; les boules XX ainsi que le manchon Y se relèvent et la valve se ferme en partie quand la machine va trop vite; l'accès de la vapeur est alors diminué et le mouvement se ralentit. La tige K du piston agit sur le balancier TS par l'intermédiaire d'un *parallélogramme de Watt* TT'R*r*, articulé par le levier *rr* au point fixe *r'*, et qui la force à se mouvoir perpendiculairement pendant que le point T décrit des arcs de cercle. Le balancier fait mouvoir à son tour la tige *bb'* d'une pompe à air, la tige *c* de la pompe alimentaire, et la bielle SS qui commande la manivelle du volant V. La tige *mn* du tiroir est mise en mouvement par l'excentrique *l*L. Le mouvement de rotation du volant V est transmis à d'autres organes par des courroies sans fin.

En LZ on voit le condenseur, qui reçoit l'eau froide injectée par le tuyau H'. Ce tuyau est percé d'un grand nombre de petits trous par où l'eau est lancée en minces filets, afin d'absorber plus vite la vapeur qui se rend dans le condenseur. La pompe B*bb'* en extrait l'air et l'eau tiède, que

le tuyau D'D amène à la pompe CC', qui la refoule dans la chandière. On On supprime souvent le condenseur dans les machines dites à *haute pression*, et la vapeur s'échappe alors dans l'air après avoir produit son effet sur le piston.

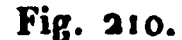
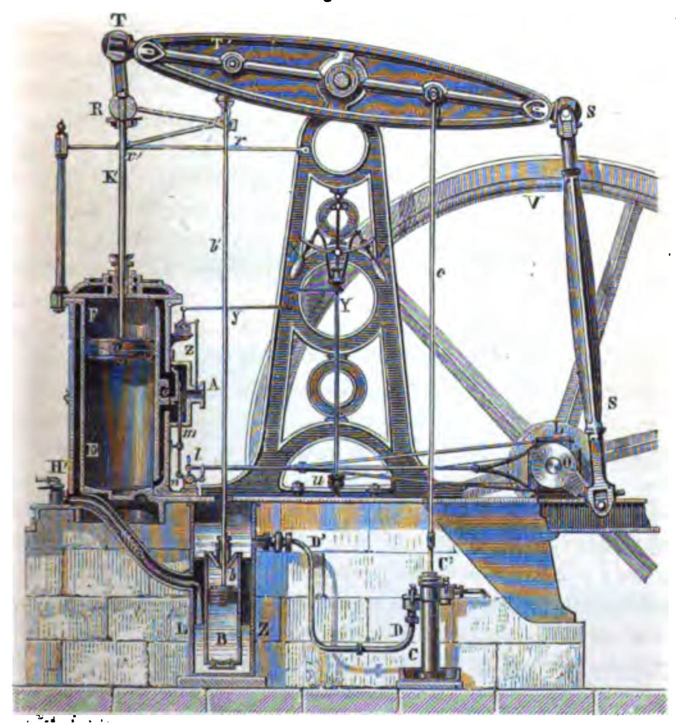


Fig. 210.

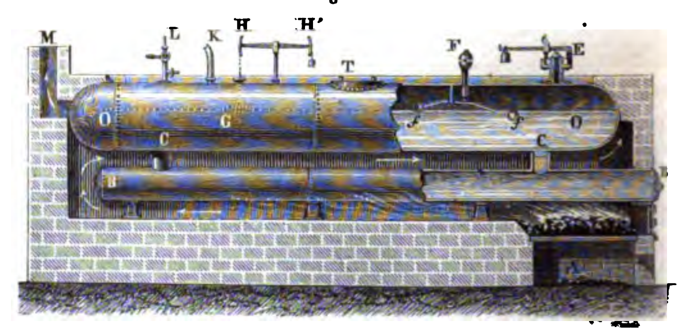


Détente de la vapeur. — Au lieu de faire arriver la vapeur dans le cylindre pendant toute la course du piston, il est avantageux d'en intercepter l'entrée à un moment donné; la vapeur introduite *se détend* alors et elle achève son travail avec une force décroissante. Cette détente diminue l'effet total, mais elle permet de réaliser une économie de vapeur et d'adoucir le mouvement de va-et-vient du piston.

Chaudière. — L'appareil qui produit la vapeur s'appelle *chaudière* ou *régénérateur*. La *fig.* 211 représente une vue longitudinale et la *fig.* 212 une coupe de la chaudière d'une machine fixe. C'est un gros cylindre de tôle OO, arrondi à ses deux bouts et communiquant par des tubulures

avec deux cylindres plus petits BB, que l'on nomme les *bouilleurs*. Ces derniers reçoivent le coup de feu du foyer, mais la flamme les contourne et

Fig. 211.



s'engage dans les carneaux CC, de manière à lécher la surface du générateur OO, qui ne doit être rempli d'eau qu'à moitié. Le levier HH', auquel est suspendue une pierre qui flotte sur l'eau de la chaudière, indique par sa position le niveau du liquide; il reste horizontal tant que l'eau conserve la hauteur voulue. Le sifflet d'alarme F avertit le chauffeur que le niveau est trop bas : il s'ouvre lorsque la retraite du liquide dérange l'équilibre du levier *ff*. La soupape de sûreté E donne issue à la vapeur quand la tension devient trop forte dans la chaudière. Le tube K amène l'eau d'alimentation, le tube L conduit la vapeur de la chaudière au cylindre dans lequel se meut le piston. T est le *trou d'homme*, que l'on ouvre pour nettoyer ou pour réparer la chaudière. Les produits de la combustion s'échappent par la cheminée M.

Fig. 212.



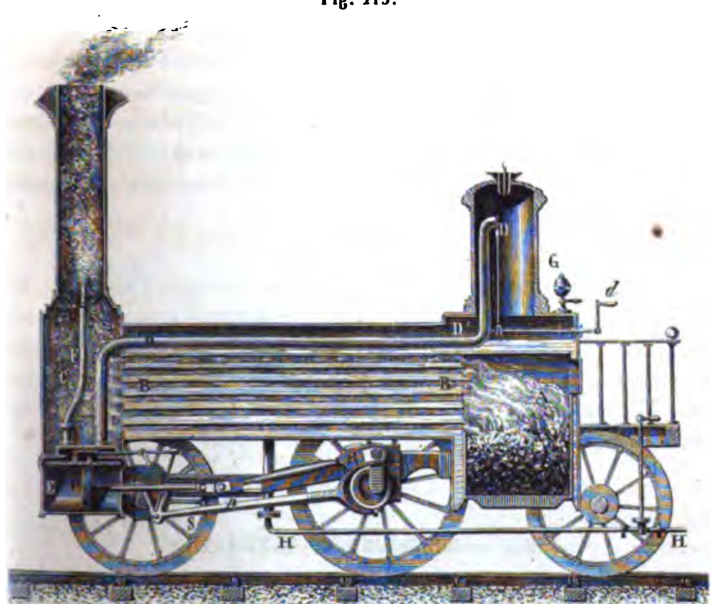
Les générateurs des locomotives et des bateaux à vapeur diffèrent beaucoup de ceux des machines fixes.

Locomotives. — Une des applications les plus importantes de la machine à vapeur est réalisée par les locomotives des chemins de fer. Ce sont des machines à haute pression et à deux cylindres, portées sur des roues que font tourner les tiges des deux pistons. La chaudière constitue le corps de la locomotive; elle est traversée par une multitude de tubes qu l'eau entoure. La flamme du foyer passe dans ces tubes et vaporise l'eau

par une surface de chauffe d'une centaine de mètres carrés. Le tirage du foyer est activé par la vapeur, qui, à sa sortie du corps de pompe, est lancée dans la cheminée et entraîne avec elle la fumée au dehors. La *fig.* 213 représente la coupe d'une locomotive dans ses principaux dé-

Fig. 213.





tails. A est le foyer, les tubes de chauffe sont représentés en BB ; le tube DD', que le mécanicien ouvre en agissant sur la poignée *d*, conduit la vapeur au cylindre E, dans lequel se meut le piston P; il y a un cylindre pareil de chaque côté de la locomotive. Le piston P agit par une bielle et une manivelle R sur l'essieu de la grande roue qui se voit au milieu entre deux roues plus petites. La cheminée F laisse s'échapper la fumée et la vapeur qui sort des cylindres E; le sifflet se voit en G; l'excentrique S agit sur la distribution de vapeur; le tube HH amène l'eau du *tender* qui suit la locomotive.

Théorie de la machine à vapeur. — Puisque la machine à vapeur engendre de la force, il est de toute nécessité qu'elle consomme de la chaleur et ne fasse qu'une simple transformation. En effet, si l'on mesure d'une part la quantité de vapeur engendrée dans la chaudière à une température et à une pression connues, on trouve qu'elle contient une quan-

tité de chaleur q. Cette vapeur traverse le cylindre ; là elle éprouve deux effets : premièrement elle se dilate et se refroidit, secondement une portion se condense et repasse à l'état liquide. Dans ces deux effets, elle abandonne une quantité de chaleur c. Pour évaluer cette chaleur, il suffit de laisser la vapeur continuer son chemin vers le condenseur, et de mesurer par les procédés calorimétriques connus la quantité de chaleur qu'elle cède à ce condenseur : on trouve q'. q' est plus petit que q ; donc, en réalité, la vapeur a laissé dans le cylindre une portion $c = q - q'$ de la chaleur qu'elle avait emmenée de la chaudière.

Or elle a produit en même temps du travail. Le piston a été chassé alternativement dans deux sens opposés et des efforts ont été faits. En évaluant la totalité de ce travail accompli T, M. Hirn a trouvé que la machine à vapeur satisfait à cette condition générale

$$430(q - q') = T.$$

Elle transforme donc purement et simplement la chaleur en travail. Elle ne la transforme pas toute ; il faut en effet échauffer l'eau jusqu'à 100 degrés, puis la vaporiser, ce qui dépense environ 650 calories ; en sortant du cylindre, la vapeur a perdu seulement la sixième partie de cette quantité, elle entraîne le reste dans le condenseur où il se perd. Le coefficient utile de la machine est donc seulement égal à $\frac{1}{6}$.

VII. — CHAUFFAGE ET VENTILATION.

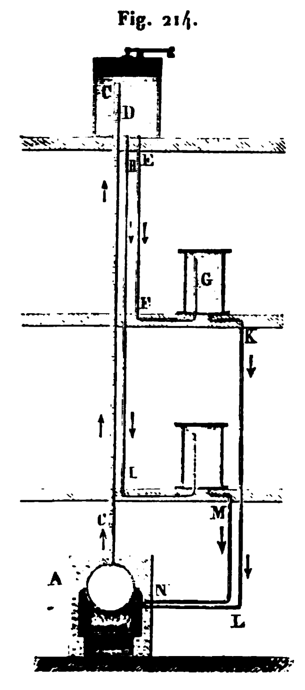
Nos cheminées remplissent un double but : elles servent à chauffer les appartements et à renouveler l'air vicié par la respiration. Le courant d'air chaud qui s'élève du foyer et traverse le tuyau de la cheminée pour se déverser au dehors entraîne avec lui une portion de l'air confiné dans l'appartement, et cet air est remplacé par celui qui s'introduit par les portes et les fenêtres. Quand l'air extérieur n'arrive pas dans la chambre en quantité suffisante, l'équilibre des pressions ne peut s'établir que par un courant descendant, qui se produit dans la cheminée à côté du courant ascendant, et alors une partie des gaz brûlés rentre dans l'appartement : la cheminée fume.

Comme moyen de chauffage, la cheminée présente beaucoup d'inconvénients. 1° La combustion y est toujours fort incomplète et une fraction notable du charbon et de l'hydrogène fournis par le combustible s'échappe sous forme de produits gazeux et est dépensée en pure perte. 2° Le courant d'air ascendant entraîne avec lui une grande partie de la chaleur dégagée.

L'échauffement de la pièce n'a lieu que par voie de rayonnement, et comme l'air est très-diathermane pour les radiations d'une haute température, elles le traversent sans l'échauffer sensiblement. Ce sont les parois de la chambre, les meubles, etc., qui absorbent la chaleur rayonnante du foyer et la cèdent ensuite à l'air, soit par contact, soit par un rayonnement de chaleur obscure.

On arrive à des résultats plus avantageux au point de vue du chauffage par les poêles et calorifères. Les *calorifères à air chaud* font pénétrer dans les appartements, par des bouches de chaleur, l'air extérieur chauffé par le contact de surfaces métalliques qui sont portées à une haute température par un foyer allumé dans une cave. Dans les *calorifères à eau chaude* (*fig* 214), c'est l'eau qui sert de véhicule à la chaleur, qu'elle prend au foyer et qu'elle transporte en circulant dans des conduits métalliques. Elle monte de la chaudière A placée dans la cave par les conduits CC jusque dans le réservoir D installé au sommet de la maison dans les combles, en vertu de la faible densité qui résulte de son élévation de température, et revient ensuite à la chaudière après s'être refroidie dans son trajet. Du réservoir D, appelé *vase d'expansion*, elle descend d'abord par une série de tuyaux EF, HI dans les poêles de fonte installés aux différents étages de la maison. Les tuyaux de cette première série conduisent l'eau chaude dans le haut des poêles; cette eau se refroidit, devient plus lourde et descend graduellement jusqu'au bas des poêles, d'où elle sort par les tubes de la seconde série KL, MN, qui la ramènent dans le bas de la chaudière; là elle s'échauffe de nouveau pour reprendre le circuit déjà parcouru, en abandonnant sur son passage la chaleur qu'elle a reçue dans la chaudière. Le vase d'expansion est muni d'une soupape de sûreté qui permet à l'air dégagé par l'eau de s'échapper.

Fig. 214.



L'eau, en vertu de sa grande chaleur spécifique, est particulièrement propre à transmettre ainsi la chaleur.

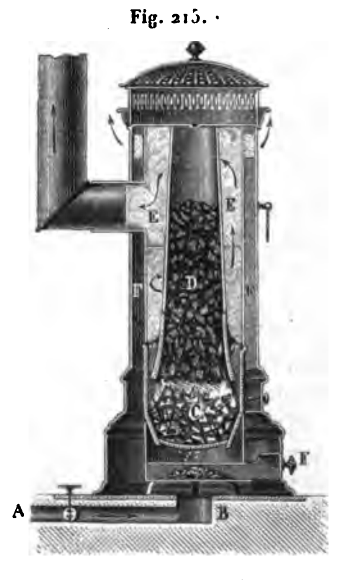
Les calorifères à eau chaude ont le grand avantage de donner une cha-

leur douce et constante et de n'exiger que très-peu de surveillance dans leur marche; le feu une fois allumé peut aller plus ou moins vite sans que la température varie sensiblement dans les pièces chauffées, à cause de la masse considérable du liquide qui reçoit et distribue la chaleur.

Dans le *chauffage à vapeur*, c'est la vapeur d'eau qui cède sa chaleur à un calorifère dans lequel elle vient se condenser; l'eau de condensation retourne à la chaudière. Ce chauffage est très-énergique en raison de la grande quantité de chaleur que la vapeur abandonne en se condensant; il convient donc particulièrement aux grands espaces, tels que magasins et ateliers.

Ces trois systèmes ont leurs avantages et leurs inconvénients; ils sont surtout trop compliqués pour être généralement employés.

Fig. 215.



Les poêles offrent un moyen de chauffage beaucoup plus simple et très-économique; leur défaut principal est de supprimer la ventilation. On doit leur préférer les *poêles-calorifères*, qui produisent un appel continu de l'air extérieur et l'échauffent avant de le laisser pénétrer dans l'appartement. Un poêle de fonte (*fig.* 215), dans lequel on brûle du coke et qui envoie sa fumée dans une cheminée ordinaire, est entouré par une chemise de tôle F percée d'une série d'ouvertures, dans laquelle l'air extérieur, arrivant par un conduit souterrain AB, s'échauffe avant de se diviser dans la pièce. L'air vicié est entraîné au dehors par une cheminée d'appel juxtaposée à la cheminée qui reçoit le tuyau à fumée du calorifère.

Le feu étant allumé sur la grille C, on remplit de coke l'espace central D, puis on replace le couvercle du poêle. Le combustible, enfermé dans un espace sans issue, brûle lentement immédiatement au-dessus de la grille. Les gaz chauds sont forcés, par deux plaques annulaires percées de trous, de parcourir un chemin sinueux indiqué par les flèches, pendant lequel ils abandonnent une partie de leur chaleur à l'air extérieur circulant dans l'espace F.

LIVRE III.

ÉLECTRICITÉ STATIQUE.

CHAPITRE PREMIER.

FAITS GÉNÉRAUX; THÉORIE ET PRODUCTION DE L'ÉLECTRICITÉ.

I. — PREMIERS EFFETS. — CONDUCTIBILITÉ.

Quand on frotte avec une étoffe de laine ou de soie, ou avec une peau de chat, un bâton de verre, de cire d'Espagne, de gomme laque ou de soufre, il acquiert la propriété d'attirer de la sciure de bois ou des barbes de plumes, ou en général des fragments déliés de corps légers. On les voit s'envoler d'abord vers le bâton frotté qui les attire, puis se disperser aussitôt dans toutes les directions, par l'effet d'une répulsion qui, après le contact, succède immédiatement à l'attraction. Si l'opérateur approche de sa joue le bâton frotté, il éprouve un chatouillement comme au contact d'une toile d'araignée. Quelquefois on sent des picotements douloureux, on entend des décrépitations et l'on voit dans l'obscurité des étincelles; après quoi le bâton a repris son état naturel.

Ces manifestations prouvent que les corps acquièrent par le frottement des propriétés spéciales qu'ils perdent par le contact avec d'autres corps; on dit qu'ils sont *électrisés*, et l'on nomme *électricité* la cause inconnue qui développe ces phénomènes.

Conducteurs et isolants. — Les corps qui s'électrisent par le frottement se nomment *idio-électriques*. Mais il y en a un grand nombre qui ne s'électrisent point : ce sont les métaux, les pierres, les organes des animaux et des végétaux; on les nomme *anélectriques*. La cause de ces différences a été découverte en 1722 par Gray. Ayant fermé un tube de verre par un bouchon de liége, il vit ce bouchon attirer les corps légers

toutes les fois que l'on frottait le tube, bien qu'il fût de lui-même anélectrique : il prenait du verre, par communication, la vertu électrique qu'il gardait ensuite. Gray attacha au bouchon une corde de chanvre de 765 pieds et la suspendit horizontalement au plafond de la salle par des rubans de soie; l'attraction électrique s'exerça dans toute l'étendue et jusqu'à l'extrémité de la corde. Cette expérience prouve : 1° que l'électricité se transmet par la corde à des distances quelconques, ce qu'on exprime en disant que le chanvre est *conducteur* de l'électricité; 2° que les rubans de soie qui soutenaient la corde empêchent cette électricité de s'échapper, qu'ils ne la *conduisent* pas, ou qu'ils sont *isolants*. Outre la soie, le verre, le soufre, la résine, etc., sont des corps isolants.

Pour qu'un corps puisse acquérir de l'électricité par frottement, il ne suffit pas qu'elle y soit développée, il faut encore qu'elle y demeure et ne se dissipe point pendant le temps qu'elle se produit. Donc, pour qu'un corps soit idio-électrique, il faut qu'il soit isolant. Au contraire, les substances conductrices sont nécessairement anélectriques, car toute l'électricité qui pourrait s'y développer serait immédiatement transmise à la main qui les tient et se perdrait dans la terre. Mais quand on les *isole* en les soutenant par un manche de verre, tous les corps s'électrisent également bien quand on les frappe avec une étoffe de laine. En réalité, il n'y a point de corps anélectriques; mais il y a des corps isolants ou conducteurs, c'est-à-dire qui gardent ou perdent la vertu électrique qu'ils reçoivent quand on les frotte.

La faculté de conduire l'électricité n'est point une propriété absolue; les corps la possèdent tous, mais à des degrés très-divers. Dans le tableau qui suit, ils sont rangés par ordre de conductibilité décroissante, depuis ceux où elle est la plus grande jusqu'à d'autres où elle n'est plus sensible et qui sont les isolants. On remarquera que le charbon de bois et le diamant isolent, mais l'anthracite, le charbon calciné et celui des cornues à gaz sont des conducteurs excellents. L'eau et sa vapeur conduisent, tandis que la glace à une basse température ne le fait plus. Ajoutons encore que la plupart des corps deviennent conducteurs à la température rouge; tels sont au moins le verre, les cristaux, les gaz, les flammes, etc.

Liste de diverses substances par ordre de conductibilité décroissante.

CONDUCTEURS.

Métaux.	Acides.	Eau.	Flamme.
Charbon calciné.	Solutions salines.	Végétaux.	Vapeur d'eau.
Plombagine.	Minerais métalliques.	Animaux.	Air raréfié.

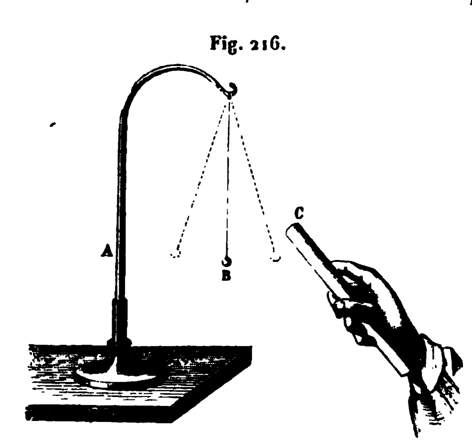
ISOLANTS.

Oxydes secs.	Caoutchouc durci.	Plumes.	Cire.
Glace.	Camphre.	Cheveux, laine.	Soufre.
Phosphore.	Marbre.	Soie.	Résines.
Chaux.	Porcelaine.	Diamant.	Ambres.
Craie.	Bois sec et chauffé.	Mica.	Gutta percha.
Lycopode.	Air et gaz secs.	Verre.	Gomme laque.
Caoutchouc.	Papier.	Jais.	Coton-poudre.

II. — DEUX ÉTATS ÉLECTRIQUES. — DEUX FLUIDES.

Suspendons (*fig.* 216) une balle conductrice de moelle de sureau par un fil isolant de soie, et faisons-la toucher par un bâton électrisé quelconque. Après le contact, la balle est électrisée par communication, et elle garde son électricité. Or l'expérience prouve qu'elle est repoussée toutes les fois qu'on approche de nouveau le bâton. On réussit également bien avec des cylindres de verre, de soufre, de cire, d'ambre, etc., et l'on conclut que *deux corps chargés d'une même électricité se repoussent mutuellement.*

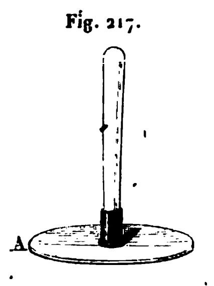
Fig. 216.

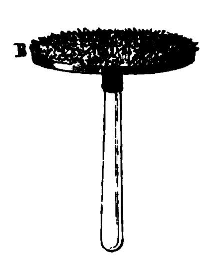


Mais lorsque le pendule B a été électrisé par le verre et repoussé par lui, il est, au contraire, attiré par la résine frottée. Inversement, s'il a primitivement touché la résine, il est repoussé par elle et attiré par le verre. Donc il existe deux modes d'électrisation par frottement : l'un sur le verre, l'autre sur la résine; ou, en d'autres termes, il y a deux espèces d'électricité : l'une *vitrée* ou *positive*, l'autre *résineuse* ou *négative*. *Les corps chargés d'électricités de même nom se repoussent et ceux qui ont des électricités contraires s'attirent.* Cette importante découverte fut faite en 1733, par Dufay, Intendant du Jardin du Roi.

Séparation des deux électricités par le frottement. — On fait frotter l'un contre l'autre deux plateaux circulaires isolés A et B (*fig.* 217) l'un de verre, l'autre de métal recouvert de laine; ensuite on les sépare vivement et on les présente à un pendule isolé que l'on a primitivement chargé d'électricité. Si elle est positive, le plateau de verre repousse le pendule et le disque de drap l'attire, mais le drap repousserait et le verre attirerait le pendule s'il était chargé d'électricité négative. En général, deux corps que l'on frotte entre eux s'électrisent, l'un positivement, l'autre négativement; les deux électricités se produisent toujours à la fois.

Fig. 217.





Quand après les avoir frottés et séparés, on réunit de nouveau les deux plateaux, chacun reçoit de l'autre et lui cède par communication la moitié de l'électricité qu'il possède, et tous deux se retrouvent ensuite à l'état naturel. Les deux électricités sont donc de telle nature et en telle proportion que, séparées, elles produisent des actions attractives et répulsives, et que, réunies, elles annulent réciproquement leurs effets. On dit alors que ces quantités équivalentes d'électricités contraires sont *égales*, puisqu'elles se détruisent.

Une même substance ne reçoit pas toujours la même espèce d'électricité quand on la frotte avec des corps différents. La laine prend l'électricité résineuse avec le verre et l'électricité vitrée avec la résine. Les divers corps éprouvent des variations analogues. On les a rangés dans un ordre tel, qu'ils sont positifs quand on les frotte avec ceux qui les suivent, et négatifs avec ceux qui les précèdent :

Poil de chat vivant.	Soie.
Verre poli.	Gomme laque.
Étoffes de laine.	Résine.
Plumes.	Coton-poudre.
Bois.	Verre dépoli.
Papier.	

D'après cela, le poil d'un chat vivant sera toujours positif et le verre dépoli toujours négatif. Des circonstances en apparence insignifiantes influent cependant sur le signe de l'électricité. Canton frotta avec de la laine un long cylindre de verre dont la moitié avait été dépolie à l'émeri; il trouva les parties polies chargées positivement, et la moitié rugueuse

négativement. Deux disques du même verre, entre lesquels il n'y a d'autre différence que le poli, s'électrisent entre eux et dans le même sens que précédemment. Quand il a été chauffé dans la flamme de l'alcool et refroidi ensuite, ou bien baigné dans un acide concentré et rincé à l'eau distillée, ce même verre devient négatif. Il en est encore de même s'il est chaud et frotté sur du verre froid; enfin deux disques identiques s'électrisent par leur frottement mutuel tantôt dans un sens et tantôt dans l'autre. En général, deux corps identiques s'électrisent mutuellement et celui qui s'échauffe le plus devient négatif : c'est ce qu'on réalise en frottant une petite surface sur une grande ou en promenant un long ruban de soie perpendiculairement à la largeur d'un autre ruban pareil.

Tout ce que nous venons d'exposer se réduit à cinq faits généraux qui résument toutes les propriétés électriques : 1° les corps frottés attirent les corps légers, ils s'électrisent; 2° il y a des substances qui transmettent la vertu électrique et d'autres qui la maintiennent fixement sur elles : il y a donc des corps conducteurs et des corps isolants; 3° il existe deux modes différents d'électrisation ou deux électricités : les corps se repoussent ou s'attirent quand ils ont de l'électricité de même nom ou de nom contraire; 4° le frottement développe sur les deux substances qui se frottent des quantités équivalentes d'électricités opposées; 5° les électricités contraires en proportions équivalentes détruisent leurs effets en se réunissant.

Symmer a imaginé un système hypothétique qui coordonne ces faits avec assez de commodité.

Hypothèse des deux fluides électriques. — 1° Il admet que tous les corps à l'état naturel contiennent en eux une quantité indéfinie, ou au moins qu'on ne peut épuiser, d'une manière subtile et sans poids, que l'on désigne sous le nom de *fluide électrique neutre*.

2° Ce fluide est formé par la réunion de deux espèces de molécules, les unes *positives*, les autres *négatives;* quand elles sont combinées, le corps qui les contient est à l'état naturel; quand il y a un excès plus ou moins grand de l'une ou de l'autre espèce de molécules, le corps est plus ou moins électrisé, positivement ou négativement.

3° Les deux fluides peuvent circuler avec une grande rapidité à travers certains corps qui sont *conducteurs;* mais ils restent fixés sur les molécules des substances *isolantes*, sans pouvoir cheminer d'un point à un autre.

4° Quand on frotte deux corps l'un sur l'autre, le fluide neutre se décompose, les molécules positives passent d'un côté et les négatives de l'autre; dès lors les deux corps se chargent d'électricités contraires, dès lors aussi, quand on les réunit après le frottement, ils se remettent à l'état

naturel, puisque les deux fluides se combinent pour reproduire l'électricité neutre.

5° On admet que les molécules de même nom se repoussent, et que les fluides de nom contraire s'attirent, en vertu d'une affinité spéciale qui tend à les combiner quand ils sont en présence et que le frottement parvient à vaincre. Si cela est ainsi, deux corps électrisés avec des fluides de même nom ou de nom contraire devront se repousser ou s'attirer, c'est-à-dire s'éloigner ou se rapprocher sous l'influence des actions que les fluides exercent entre eux, actions qui entraînent la matière elle-même.

Il est essentiel de remarquer que la théorie de Symmer est tout à fait hypothétique. C'est une simple traduction des lois générales de l'électricité. On la conserve par habitude, bien qu'on ait de graves raisons pour douter de sa réalité.

III. — LES MACHINES ÉLECTRIQUES.

Machine électrique ordinaire. — La machine employée en France a pour organe principal un plateau de verre (*fig.* 218), traversé par un axe métallique autour duquel on le fait tourner par une manivelle M. Par ce mouvement, les points des deux faces du verre viennent successivement passer entre deux systèmes de coussins A et A′ et y prennent l'électricité positive.

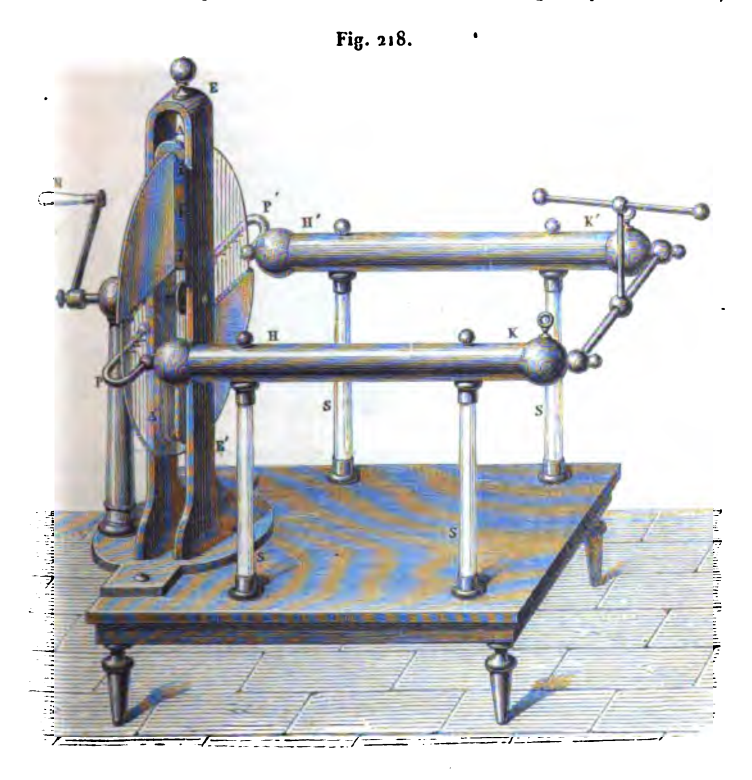
Si les coussins étaient isolés, ils prendraient $-e$ d'électricité pendant que le verre prendrait $+e$, et l'équilibre serait atteint quand la tendance de ces électricités à se recomposer serait devenue égale à l'action séparatrice du frottement. Cette tendance diminue si l'on met les coussins en relation avec le sol, et, en continuant le frottement, on produit une nouvelle décomposition qui ajoute une certaine quantité de fluide à celle que le plateau avait déjà acquise.

Les coussins communiquent avec le sol par une règle de cuivre qui règne sur toute la longueur du support EE′ et qui se relie à une chaîne qu'on laisse toujours pendre. Ils sont formés d'une plaque de bois recouverte de cuir, bourrés de crin, soigneusement garnis de feuilles métalliques et pressés sur le verre par des ressorts. Ils développeraient très-peu d'électricité si on ne les couvrait avec certaines substances, telles que l'or musif ou un amalgame d'étain et de zinc.

Deux cylindres de laiton HK, H′K′, réunis entre eux et soutenus sur des pieds de verre, sont dirigés perpendiculairement au plateau vers les deux

extrémités de son diamètre horizontal. Ils sont terminés par deux mâchoires P, P, contournées en forme d'U et garnies de pointes dirigées vers les deux faces du plateau. Ces *conducteurs* se chargent par influence,

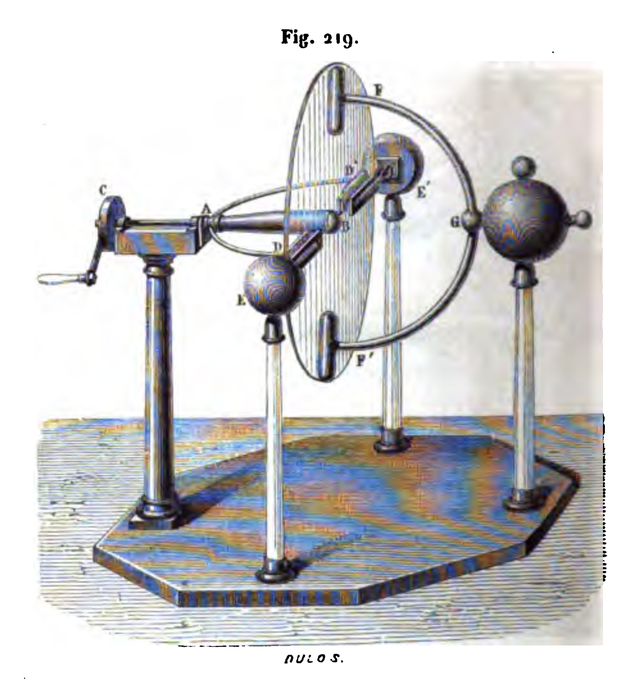
Fig. 218.



c'est-à-dire que leur fluide neutre est décomposé, que l'électricité positive repoussée est reléguée aux parties les plus éloignées, tandis que le fluide négatif qui est attiré s'accumule sur les pointes. On verra dans la suite qu'il n'y peut demeurer et qu'il s'échappe sous forme d'aigrettes pour neutraliser le fluide positif du plateau. De cette façon, le plateau, ramené à l'état naturel, peut s'électriser par un nouveau frottement, et, d'un autre côté, le conducteur est exclusivement chargé d'électricité positive, surtout à ses extrémités K, K'. On empêche toute déperdition par l'air dans le trajet que fait le verre, depuis les coussins où il s'électrise jusqu'à la mâchoire où il se décharge, en enveloppant le plateau d'un écran double de taffetas ciré.

Machine Van Marum. — La machine de Van Marum (*fig.* 219) permet de recueillir l'une ou l'autre des deux électricités. L'axe de rotation CAB, équilibré par une masse C, supporte le plateau à l'autre extrémité B. Les coussins E, E', ainsi que le conducteur G, sont isolés sur des pieds de verre.

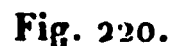
Fig. 219.

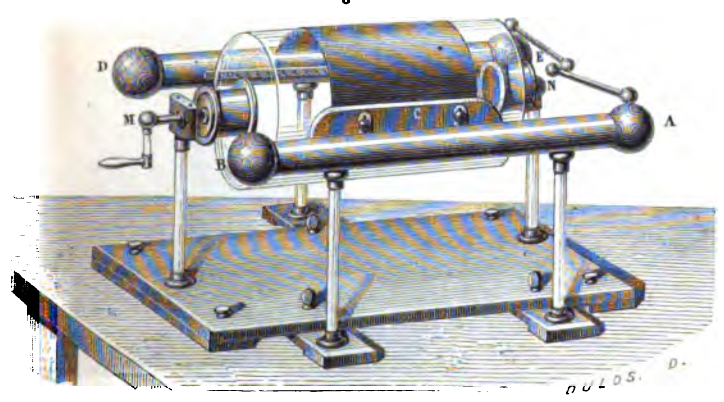


Deux arcs métalliques DD', FF', le premier relié au sol par une chaîne pendante, le second fixé au conducteur, peuvent tourner en A et en G, de manière à se placer soit verticalement, soit horizontalement et en contact avec les coussins. La machine fonctionne de deux manières : 1° on fait communiquer les coussins au sol par l'arc DD' et l'on met verticalement le conducteur FF', qui se charge positivement, comme dans la machine ordinaire ; 2° on réunit les coussins avec le conducteur FF', et l'on dirige verticalement l'arc DD'; l'électricité du verre rentre dans le sol, et celle des coussins, la négative, est accumulée dans le conducteur.

Machine de Nairne. — La machine de Nairne (*fig.* 220) fournit à la fois les deux électricités. Le plateau y est remplacé par un manchon de verre qu'on fait tourner sur son axe MN par une manivelle. Il n'y a qu'un

seul coussin C, porté sur un conducteur isolé AB; de l'autre côté est le conducteur ordinaire DE, isolé, et armé de pointes dirigées vers le verre.


Fig. 220.



Machine Armstrong. — Un mécanicien anglais, occupé à réparer des fuites dans la chaudière d'une machine à vapeur, vit des étincelles et éprouva des secousses quand il tenait une de ses mains dans le jet de vapeur et qu'il touchait avec l'autre la soupape de sûreté. M. Armstrong, qui étudia ce phénomène, reconnut que la séparation des deux fluides se fait, non dans l'intérieur de l'appareil pendant l'ébullition, mais au point où la vapeur sort en frottant contre les parois du robinet. M. Faraday prouva ensuite que la vapeur ne donne point d'électricité quand elle est surchauffée et sèche, tandis qu'elle en produit abondamment quand on la fait passer, avant sa sortie, dans une boîte contenant de l'étoupe mouillée, où elle se charge de gouttelettes liquides. Ce sont ces gouttes qui s'électrisent en frottant contre les parois du bec.

Quand l'eau de la chaudière est distillée, le bec devient négatif et le jet de vapeur positif. L'eau ordinaire ou saline ne produit rien. Avec des essences ou des corps gras, la vapeur est négative et la chaudière positive. La production de l'électricité dépend aussi de la matière des becs; elle est nulle s'ils sont en ivoire, et abondante quand ils sont métalliques; le bois de buis donne les résultats les plus énergiques.

La machine Armstrong (*fig.* 221) est fondée sur ces propriétés. Elle se compose d'une chaudière remplie d'eau distillée qu'on porte à 6 atmosphères. La vapeur s'échappe à travers des becs C après avoir été refroidie dans une boîte pleine d'eau D, qui est représentée à part dans la *fig.* 222;

en sortant elle contourne une lame verticale de buis sur laquelle elle frotte

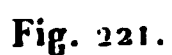
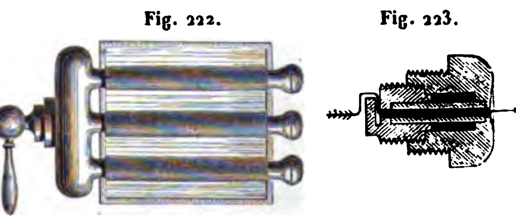


Fig. 221.



Fig. 222. Fig. 223.



(*fig.* 223) et qu'elle charge négativement en prenant elle-même l'électricité

positive. On recueille cette électricité sur un peigne de laiton B qui est isolé. Cette machine atteint une grande énergie. Celle que possède l'Institution Polytechnique de Londres et qui a 2 mètres de longueur, donne 46 jets; elle produit des étincelles de 60 centimètres de longueur, qui éclatent d'une manière à peu près continue.

Expériences diverses. — On fait avec les machines électriques des expériences nombreuses. L'une des plus curieuses est celle du tabouret isolant, lequel est constitué par une planche soutenue sur des pieds de verre. Quand on y fait monter une personne et qu'elle touche la machine, elle en partage l'électricité et prend toutes les propriétés d'un conducteur chargé. On voit ses cheveux se dresser par l'effet de la répulsion qu'ils éprouvent, et l'on obtient des étincelles quand on approche de son corps un conducteur en communication avec le sol.

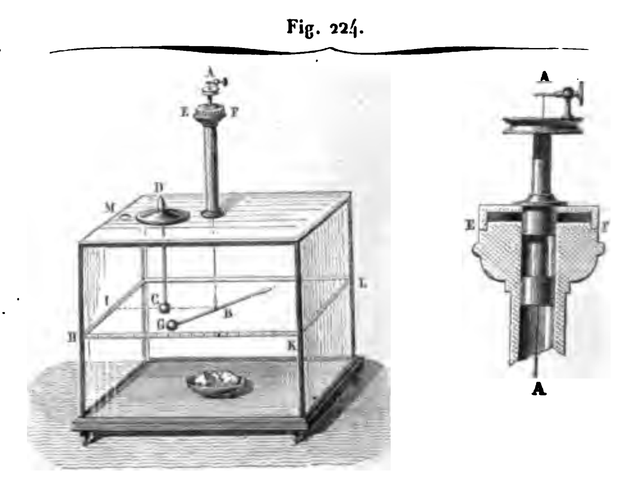
CHAPITRE II.

MESURE DES ACTIONS ÉLECTRIQUES.

I. — LOIS DES ATTRACTIONS ET DES RÉPULSIONS.

Balance de torsion. — Concevons un fil métallique AB extrêmement fin, fixé en A et supportant en B une aiguille horizontale isolante GB, terminée par une balle de sureau G (*fig.* 224). Si nous touchons cette balle avec un corps électrisé C, il la repoussera en déviant l'aiguille, et la torsion

Fig. 224.



du fil agira pour ramener la balle dans sa position première. On pourra donc équilibrer la répulsion électrique par la force de torsion, et comme celle-ci est proportionnelle à l'angle de torsion, on comparera les forces électriques en comparant les angles dont il faudra tordre le fil pour les équilibrer.

La balance de torsion que Coulomb construisit dans ce but est renfermée dans une grande cage cubique de verre (*fig.* 224) : sur le couvercle s'élève verticalement un tube, et au haut de celui-ci, on voit un treuil A qui soutient le fil métallique AB; ce treuil peut tourner dans sa monture, afin d'orienter l'aiguille BG et de la placer dans le plan vertical DCB, vis-à-vis le point I qui est le zéro des divisions.

On introduit ensuite en DC une tige de gomme laque terminée par une balle de sureau fixe, égale à la balle mobile G, ce qui écarte cette dernière de la position C; toutes deux se tiennent au contact, pressées l'une contre l'autre par la légère torsion qu'éprouve le fil. Cela fait, on électrise les balles par une épingle isolée qu'on introduit en M; elles se repoussent, et l'aiguille se fixe en G quand la torsion fait équilibre à la répulsion. On mesure l'angle IBG sur une bande de papier IHKL divisée en degrés. La pièce AEF qui porte le fil tourne à frottement doux sur la douille qui termine le tube de verre, et les contours de ces deux pièces portent l'un une division circulaire, l'autre un vernier. On peut donc ramener l'aiguille de G vers C, ou l'éloigner davantage de C, en tournant le micromètre supérieur, et le vernier indique l'angle de rotation.

Influence de la distance. — Supposons que les deux boules aient été chargées d'électricité de même nom et que l'angle initial d'écart soit de 36 degrés. A ce moment la torsion du fil est elle-même de 36 degrés. Pour ramener les balles à une distance moitié moindre, c'est-à-dire à 18 degrés, il faut tourner le micromètre de 126 degrés de G vers C. Ici, le fil a éprouvé deux torsions, l'une de 126 degrés de G vers C, l'autre de 18 degrés de C vers G; la torsion totale est égale à la somme $126° + 18° = 144°$ ou 4 fois 36 degrés. Pour réduire la distance au quart, ou à 9 degrés, il faut tourner le micromètre de 567 degrés, et la torsion totale est alors égale à $567° + 9° = 576°$, c'est-à-dire 16 fois 36 degrés. Ainsi donc les distances variant comme les nombres 1, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$, les arcs de torsion et, par suite, les forces répulsives suivent la progression des nombres 1, 4, 16, c'est-à-dire que la répulsion de deux balles égales, électrisées par un contact commun, est en raison inverse du carré des distances.

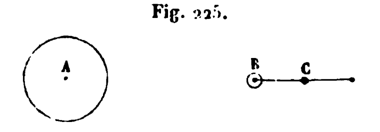
Pour trouver la loi des attractions, on commence par électriser négativement la balle G, on l'écarte d'un angle c en tournant du même angle le micromètre supérieur, puis on électrise positivement la balle C. L'attraction réduit la distance angulaire à une valeur a et tord le fil d'une quantité $c - a$; la force attractive est $c - a$ à la distance a. Ensuite on fait varier c, on mesure les valeurs correspondantes de a, et on trouve que les forces attractives sont en raison inverse des carrés de a. En résumé *les attractions et les répulsions sont en raison inverse des carrés des distances.*

Influence des quantités d'électricité. — Les répulsions et les attractions dépendent aussi de la quantité d'électricité qui est répandue sur chacune des balles. Chargeons comme précédemment les deux balles avec la même électricité, et après qu'elles se seront repoussées, réduisons l'angle d'écart à 28 degrés en tordant le fil. Soit 148 degrés la torsion totale.

Touchons ensuite la boule fixe avec une autre qui soit isolée et identique : l'électricité qui était répandue sur la première se partagera également sur toutes les deux, et la balle fixe ne conservera plus que la moitié du fluide qu'elle possédait auparavant. Retirant alors la balle avec laquelle on l'a touchée, on voit que la répulsion a diminué et que, pour maintenir l'aiguille à 28 degrés, il ne faut plus qu'une torsion que Coulomb a trouvée être de 72 degrés. Or 72 est à peu près la moitié de 148 ; on en conclut que, toutes choses égales d'ailleurs, la répulsion est proportionnelle à la charge électrique de la balle fixe. La même épreuve donne le même résultat en touchant la balle mobile, et l'on obtient encore la même loi quand les balles, au lieu de se repousser, s'attirent : par conséquent, *les forces répulsives et attractives sont proportionnelles au produit des quantités d'électricité répandues sur les deux boules.*

Méthode des oscillations. — Pour confirmer ces résultats par une autre méthode, Coulomb plaça vis-à-vis d'une sphère métallique A, parfaitement isolée et chargée d'électricité (*fig.* 225), un pendule BC formé par une aiguille horizontale de gomme laque, terminée par une balle de sureau B et soutenue par un long fil de cocon attaché en C ; il chargea la balle B avec une électricité opposée à celle de A, et il la fit osciller.

Fig. 225.



Soit d la distance AB, l la longueur BC, f l'accélération due à la force qui sollicite la balle B ; la durée T de n oscillations sera donnée par la formule du pendule, $T = n\pi\sqrt{\frac{l}{f}}$. En réduisant ensuite la distance AB à une valeur d', on aura $T' = n\pi\sqrt{\frac{l}{f'}}$, d'où $\frac{T^2}{T'^2} = \frac{f'}{f}$.

Or l'expérience a montré que les temps étaient proportionnels aux distances d et d' : donc

$$\frac{f'}{f} = \frac{d^2}{d'^2},$$

c'est-à-dire que *les forces attractives sont en raison inverse des carrés des distances.*

Si l'on voulait comparer les répulsions à diverses distances, il suffirait de charger de fluides de même nom les deux appareils opposés ; dans ce cas, l'aiguille se retournerait, mais elle oscillerait encore suivant les mêmes lois. Enfin, pour vérifier la loi des quantités d'électricité, il faudra, sans changer la distance et l'état électrique de l'aiguille, toucher la sphère avec

une autre sphère de même dimension, de manière à lui enlever la moitié de sa charge, et comparer l'effet réduit avec l'effet primitif.

II. — LOIS DE LA DÉPERDITION.

L'expérience nous apprend que tous les corps, après avoir été chargés d'électricité, la perdent peu à peu pour revenir à l'état naturel. Cette perte est due à deux causes : l'imperfection des supports isolants et la conductibilité de l'air. Il n'est pas de substances parfaitement isolantes. Si l'on touche un corps électrisé avec des aiguilles de gomme laque, de verre ou de soufre, elles se chargent à la longue d'une quantité de fluide électrique considérable à l'extrémité qui a touché, et de moins en moins grande vers l'autre extrémité. Dès lors, tout conducteur perdra par ses supports une certaine quantité de son électricité. L'air agit d'une manière spéciale : s'il est sec, on suppose que ses molécules qui touchent les surfaces électrisées y prennent du fluide qu'elles transportent au loin, puisqu'elles sont repoussées ; s'il est humide, il devient bon conducteur et enlève instantanément toute l'électricité des corps chargés.

Le phénomène de la déperdition est donc complexe. Pour l'étudier, il faut d'abord éliminer l'une des deux causes qui le produisent. Voici comment s'y prit Coulomb. Il soutint la balle fixe de sa balance par le support qu'il voulait essayer, et mesura de minute en minute la diminution de la force répulsive ; ensuite il supporta la même balle par deux isoloirs pareils au premier et recommença l'épreuve. Si la perte était augmentée, c'est que chacun des supports enlevait plus que l'air ; si, au contraire, elle n'avait pas varié, les supports ne laissaient pas échapper plus d'électricité que ne l'avait fait l'air lui-même ; alors les lois de la perte étaient les mêmes que si le corps était libre, c'est-à-dire plongé en entier dans l'atmosphère de la cage. De longs supports de gomme laque satisfont à cette condition.

Loi de la perte par l'air. — On électrise en commun les deux balles isolées ; elles se repoussent ; mais on les ramène l'une vers l'autre par une torsion convenable. Supposons qu'à un moment donné l'écart soit de 20 degrés et la torsion totale égale à A. Elle sera proportionnelle à la quantité d'électricité des deux balles, et pourra servir à la mesurer. Peu à peu l'écart tend à diminuer, mais on le maintient constant à 20 degrés en diminuant la torsion qui devient A′ après un temps t. Or l'expérience prouve que, si le temps croît en progression arithmétique, la torsion A′, c'est-à-dire

la quantité d'électricité, décroît en progression géométrique. Par exemple, au bout de dix minutes, elle se réduit au quart, au bout de vingt minutes au seizième, et ainsi de suite.

Cette loi peut s'exprimer par la formule

$$A' = A\alpha^{-t}. \tag{1}$$

A et A' sont proportionnels aux produits des quantités d'électricité distribuées sur les deux balles. En les désignant par E, E_1 et E', E'_1, on aura $E'E'_1 = EE_1.\alpha^{-t}$, et si les deux balles sont égales ($E = E_1$, $E' = E'_1$), il vient

$$E' = E\alpha^{-\frac{t}{2}}. \tag{2}$$

Ces formules peuvent servir à calculer l'angle de torsion A' et la quantité d'électricité E' après un temps quelconque. En prenant les logarithmes des deux membres, on a $\log A' = \log A - t\log\alpha$ et $\log E' = \log E - \frac{1}{2}t\log\alpha$.

Suivant les conditions atmosphériques, le coefficient α change, ce qui veut dire que la quantité d'électricité perdue dans les mêmes temps varie.

Toutefois, la loi de Coulomb n'a pas toute la généralité qu'on lui avait supposée. Elle est en défaut pour des charges très-élevées ou très-basses.

La pression du milieu gazeux ambiant exerce une grande influence sur la déperdition. Si l'on charge avec une source puissante un conducteur isolé et placé dans un gaz raréfié, il perd pendant les premiers moments une très grande partie de son fluide, qui s'échappe presque instantanément; il garde ensuite une charge limite qui se perd très-lentement et qui est d'autant plus faible que la pression du gaz est moindre. Voici comment Matteucci le démontre.

Il retire de la balance la balle fixe avec le support qui la soutient et il la dispose, toujours isolée, au milieu d'une cloche posée sur la machine pneumatique. Il raréfie l'air jusqu'à une pression déterminée; après quoi il charge la balle au moyen d'un conducteur qui traverse la cloche et qui lui fournit toujours la même quantité d'électricité. Immédiatement après, il laisse rentrer l'air, reprend la balle pour la remettre dans la balance et pour mesurer la charge électrique qu'elle a reçue dans l'air raréfié. Il trouve que cette charge est d'autant moindre que le vide était plus parfait et *en raison directe de la pression de l'air* au moment où la charge a été donnée.

Puisque le conducteur a conservé ensuite une charge limite, voyons comment celle-ci se perd dans l'air raréfié où elle est produite. A cet effet, Matteucci construisit une balance de torsion dans une cloche où l'on pouvait faire le vide et où l'on électrisait les balles par un conducteur mobile qui s'enfonçait à frottement dans la tubulure. Il trouva que la déperdition était d'autant plus lente que l'air était plus raréfié. Ainsi, quand la pres-

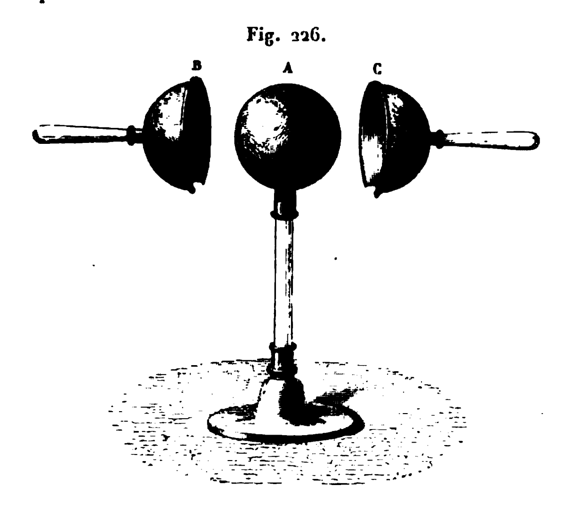
sion de l'air était de 757 millimètres et qu'on électrisait les balles jusqu'à une torsion de 38 degrés, elles étaient revenues au contact après quatre heures cinq minutes. Mais à une pression de 400 millimètres et avec le même écart initial, les balles présentaient encore, après quatorze heures, un écartement de 13 degrés. Quand on diminue la pression davantage, elles restent encore plus longtemps écartées. Dans le vide absolu, la perte électrique serait nulle, mais la charge limite serait très-faible.

Perte par les supports. — Le verre, le soufre, la soie, la résine et, en général, les corps mauvais conducteurs ne sont capables d'isoler une charge électrique donnée que s'ils ont une longueur suffisante. Coulomb a montré que les quantités d'électricité qu'un cylindre peut isoler sont en raison de la racine carrée de sa longueur.

III. — LOIS DE LA DISTRIBUTION.

Nous allons d'abord prouver que l'électricité se répand à la surface des corps sans pénétrer dans leur intérieur.

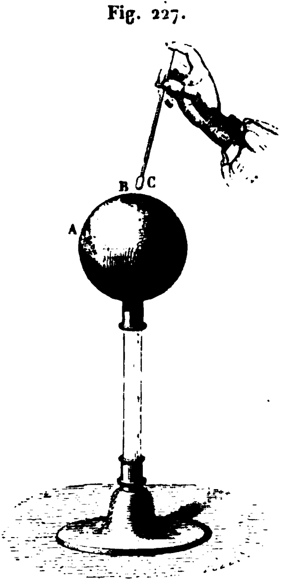
Fig. 226.



1° On prend une sphère métallique A (*fig.* 226), sur laquelle on applique deux calottes hémisphériques B et C munies de manches de verre. On électrise le système, puis on enlève à la fois les deux hémisphères, et, en les présentant tous deux à un pendule, on voit qu'ils sont électrisés, tandis que la sphère A reste à l'état naturel.

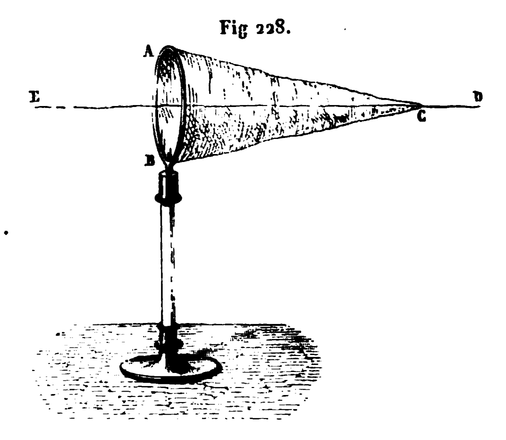
2° On électrise une sphère creuse de laiton (*fig.* 227) qui est percée d'un trou B à sa partie supérieure. Si on la touche en un point extérieur A avec un disque de clinquant isolé C, il reçoit par ce contact une partie de l'électricité qui couvre le point touché; mais quand on la plonge à l'intérieur, on ne ramène aucune électricité.

Fig. 227.



3° Faraday soutient par un support isolant un cercle métallique AB (*fig.* 228), auquel est attaché un sac conique de batiste conductrice ABC. Un fil isolant de soie ECD permet de retourner le filet. Après avoir mis cet appareil en communication avec la machine électrique, on trouve, en le touchant avec le disque de clinquant, que l'extérieur est électrisé pendant que l'intérieur ne l'est pas, puis en tirant le fil EC de manière à ramener à l'intérieur la face qui était externe, on voit que les rôles des deux surfaces ont changé en même temps que leurs positions, c'est-à-dire que l'électricité a quitté l'une pour se porter sur l'autre.

Fig 228.



4° Sur un gros tube de verre, on colle l'extrémité d'un long ruban d'étain laminé qu'on laisse pendre, et qui est terminé par un pendule

formé de deux petites balles de sureau. On électrise ce ruban, ce qui fait diverger les balles, puis on l'enroule sur le tube en tournant celui-ci, et l'électricité, qui d'abord était répandue sur les deux surfaces, abandonne peu à peu les parties du ruban qui se superposent en s'enroulant, et se concentre sur celles qui restent libres : aussi voit-on croître leur charge et augmenter la divergence des balles. L'effet inverse se produit quand ensuite on déroule la bande métallique.

Ces expériences montrent que le fluide électrique est confiné à la surface extérieure des conducteurs, et qu'il s'y distribue en une couche extrêmement mince. Quand la charge augmente ou diminue, on admet que l'épaisseur de cette couche augmente proportionnellement.

Procédé de mesure. — Si le conducteur est sphérique, il est évident que la couche électrique doit être égale en tous les points de la surface, au même moment. Quand la forme est différente, l'électricité se porte en plus grande proportion sur certaines parties que sur d'autres. Voici comment Coulomb mesure le rapport des épaisseurs électriques aux divers points de la surface. Il fixe un disque plan de clinquant à l'extrémité d'une aiguille de gomme laque : c'est le *plan d'épreuve;* puis il le pose à plat sur les points du conducteur dont il veut étudier la charge. Comme ce disque est très-petit, on peut admettre qu'il se confond avec la surface qu'il couvre, et que l'électricité, abandonnant les points recouverts, se porte en totalité sur la face extérieure du disque. En retirant celui-ci, on ramène la couche électrique qui, avant l'opération, existait sur les parties touchées. On met ensuite ce plan d'épreuve dans la balance de torsion à la place de la boule fixe, vis-à-vis l'aiguille mobile primitivement chargée d'une quantité constante d'électricité de même nom; on mesure à une distance fixe α la répulsion A, et on admet qu'elle est proportionnelle à la quantité d'électricité enlevée, c'est-à-dire à l'épaisseur électrique au point touché. On répète ensuite la même opération en touchant une autre partie du conducteur, on mesure à la même distance α une seconde torsion A', et le rapport de A à A' exprimerait le rapport des épaisseurs électriques aux deux points touchés, s'il n'y avait pas eu de perte entre les deux opérations.

Désignons par a, b les deux points que l'on veut comparer. On a d'abord touché a et mesuré la répulsion A; cette opération a pris environ trois minutes. Ensuite on a touché b et mesuré B, ce qui a pris encore trois minutes. Coulomb revient ensuite au point a, après le même intervalle de trois minutes; il recommence la mesure, ce qui donne une autre torsion A', et il admet que la moyenne de A et de A' exprime la répulsion que l'on

eût trouvée en *a* si l'on avait touché ce point en même temps que l'on a touché le point *b*.

Résultats. — I. Coulomb examina par cette méthode la distribution de l'électricité sur une lame d'acier d'une longueur de 11 pouces. Il trouva que l'épaisseur électrique était constante depuis le milieu de cette lame jusqu'à 1 pouce de l'extrémité, qu'à partir de là elle augmentait jusqu'à l'extrémité même où elle était deux fois plus grande qu'au milieu.

II. Cette augmentation rapide de l'épaisseur électrique se retrouve sur les bords de toutes les plaques. Ainsi, un disque de métal de 10 pouces de diamètre offrit les résultats suivants :

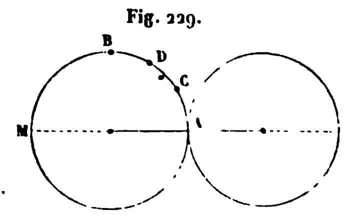
Distances au centre.	Épaisseur électrique.
0pouce	1,000
1	1,001
2	1,005
3	1,170
4	2,070
5	2,900

III. Un cylindre à base circulaire de 2 pouces de diamètre et de 30 de longueur, terminé par deux hémisphères, donna les nombres suivants :

Distances au milieu.	Épaisseurs.
0pouce	1,00
12	1,25
14	1,80
15	2,30

IV. Quand deux sphères égales sont en contact, la charge est nulle au point A (*fig.* 229), et reste insensible jusqu'à une distance angulaire égale à 20 degrés. A partir de ce point, en s'éloignant encore de A, on commence à trouver une couche électrique appréciable, et qui augmente rapidement jusqu'au point B, situé à 90 degrés, et lentement depuis B jusqu'au point M opposé au contact.

Fig. 229.



Quand les sphères sont inégales, l'épaisseur en M est plus grande sur le petit globe que sur le grand. Si on les sépare, le gros globe garde plus d'électricité que le petit, mais le petit conserve en chaque point une épaisseur électrique plus grande; elle tend à devenir double de celle qui reste sur le plus gros lorsque le rayon du petit globe diminue indéfiniment.

V. Dans un ellipsoïde, la couche électrique est comprise entre la surface du corps et une surface semblable décrite à l'extérieur à une distance très-petite de la première, d'où il résulte qu'à l'extrémité des axes l'épaisseur de la couche est proportionnelle à leurs longueurs.

VI. Si l'on suppose que l'un des axes de cet ellipsoïde est infini, il se termine en une pointe, et à l'extrémité de cette pointe l'épaisseur électrique est infinie.

Pouvoir des pointes. — Puisque l'épaisseur électrique est infinie à l'extrémité des pointes, la tension, ou l'effort exercé par le fluide contre l'air, doit être aussi infinie, et l'électricité doit s'échapper dans l'atmosphère. C'est ce que l'expérience confirme, car en plaçant sur une machine électrique un conducteur pointu, elle ne se charge plus, l'électricité disparaissant à mesure qu'elle est produite. Dans l'obscurité, on voit la pointe terminée par une aigrette lumineuse qui s'étale en divergant et en diminuant peu à peu d'éclat; on entend, en outre, un bruit sourd et de petits picotements qui semblent venir d'une série de faibles étincelles. L'aigrette augmente si l'on promène au-dessus d'elle un conducteur métallique; il est influencé, réagit sur la pointe, et augmente encore sa charge et l'écoulement électrique.

Inversement, si l'on dirige vers le conducteur d'une machine une pointe métallique en communication avec le sol, elle se charge par influence du fluide négatif, dont la tension est infinie, et qui s'écoule vers la machine. Alors celle-ci ne se charge plus, parce qu'elle reçoit à chaque instant de la pointe une quantité d'électricité égale et contraire à celle qu'elle produit.

L'aigrette négative est moins brillante que l'aigrette positive; elle se réduit le plus souvent à un point lumineux qui ne se prolonge et ne se dilate pas.

Les aigrettes sont toujours accompagnées d'un mouvement de l'air qui part de la pointe, et que l'on a nommé *vent électrique*. On le sent en promenant la main au-dessus; souvent il est assez fort pour incliner la flamme d'une bougie et l'éteindre.

On explique à la fois les aigrettes et le vent en admettant que l'air placé au sommet de la pointe s'électrise sous l'influence de la tension infinie que l'électricité acquiert en ce point, et que ses molécules se repoussent ensuite et s'échappent dans le sens de l'aigrette.

CHAPITRE III.

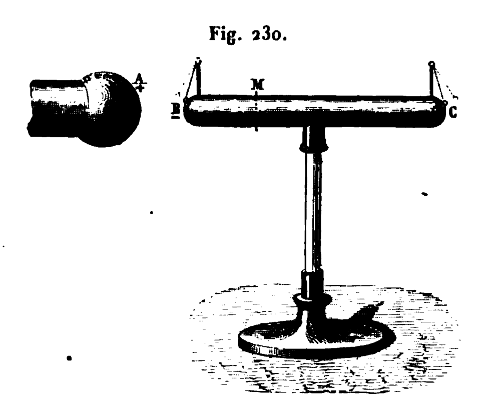
PHÉNOMÈNES D'INFLUENCE.

I. — THÉORIE DE L'INFLUENCE.

Un corps électrisé détermine, à distance, ou une décomposition du fluide neutre, ou une modification dans la distribution de l'électricité libre sur tous les corps placés dans son voisinage : cette action est désignée sous le nom d'*influence* ou d'*induction électrique*.

Cas d'un conducteur à l'état naturel. — Plaçons dans le voisinage d'un appareil chargé positivement, A (*fig.* 230), un conducteur BC isolé par un support de verre et portant à ses extrémités des pendules électriques. Aussitôt que l'action de A se fera sentir, les pendules B et C divergeront, et si l'on en approche un pendule primitivement chargé avec un fluide connu, on constate que l'électricité est positive en C et négative en B; de plus, il y a sur le cylindre une section M qui est à l'état neutre, que l'on nomme la *ligne moyenne*, et à partir de laquelle les charges croissent avec des signes inverses en s'approchant des extrémités où elles atteignent leur maximum. Si l'on supprime l'électricité du corps A en le mettant en communication avec le sol, les pendules s'abaissent aussitôt, et le conducteur BC rentre à l'état naturel.

Fig. 230.



La théorie des deux fluides explique aisément ces faits. L'électricité de A décompose le fluide naturel de BC, attire et accumule le négatif vers B et repousse le positif en C, une section moyenne M est à l'état neutre. Mais

les électricités séparées tendant à se réunir en vertu de leur attraction mutuelle, la décomposition sera limitée, et l'équilibre aura lieu quand la force qui tend à recomposer les fluides égalera celle qui est exercée par A. Tout signe électrique disparaît aussitôt qu'on décharge le corps A.

Les deux fluides ne sont point distribués symétriquement sur BM et MC. L'attraction qui accumule le fluide négatif en B est plus grande, à cause de la distance moindre, que la répulsion qui refoule le positif en C; d'où l'on conclut : 1° que la ligne moyenne est plus près de B que de C, ce que l'expérience vérifie; 2° que l'épaisseur électrique est plus grande en B qu'en C; 3° que la perte de l'électricité positive doit être plus lente que celle de l'électricité négative, ce qui fait qu'en prolongeant l'expérience on finit par n'avoir plus que du fluide positif sur le conducteur. Si BC augmentait progressivement de longueur, l'attraction réciproque des deux électricités séparées sur sa surface diminuerait, et, comme c'est cette attraction qui limite la décomposition, il s'accumulerait d'autant plus de fluide sur BC que sa longueur serait plus grande. Cette dernière remarque va de suite trouver son application.

Revenons à l'expérience primitive; mais, au lieu d'isoler le conducteur BC, réunissons-le avec le sol par une communication établie d'abord en C. L'influence se produira, comme précédemment, non pas seulement sur le conducteur BC, mais sur un conducteur composé de BC, de la tige de communication et de la terre tout entière. Dans ce cas, la ligne moyenne sera reculée indéfiniment, et puisque le conducteur total est devenu infini, la charge doit avoir augmenté jusqu'à un maximum. Aussi voit-on la divergence du pendule devenir plus grande en B au moment même où l'on établit la réunion du point C avec le sol.

Que l'on enlève ensuite la tige de communication, on ne change rien ni à la quantité de fluide négatif que contient BC, ni à sa distribution sur les divers points; mais si l'on vient enfin ou à éloigner, ou à décharger le conducteur A, l'électricité se répand librement sur BC, qui se trouve ainsi et reste chargé par influence d'un fluide contraire à celui de A. En résumé, nous venons de constater trois phénomènes distincts : 1° un développement de deux électricités contraires aux deux bouts d'un cylindre influencé; 2° le retour de ce conducteur à l'état naturel quand l'influence cesse; 3° une charge permanente de BC avec une électricité contraire à A, quand d'abord on touche le conducteur avec la tige, qu'ensuite on enlève la communication et qu'enfin on décharge A.

Nous avons supposé que l'on établissait la communication du conducteur avec le sol en touchant le point C qui est le plus éloigné de A, mais on pourrait toucher toute autre partie de BC, et même le point B, sans changer

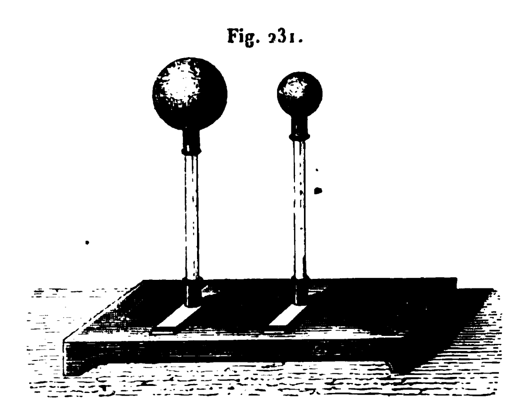
le résultat général de l'expérience. L'influence se produirait toujours de la même manière : la ligne moyenne serait encore à l'infini ; tous les points de BC et ceux de la tige seraient chargés négativement ; en enlevant cette tige, le conducteur conserverait encore son électricité, qui se répandrait librement sur toute la surface si l'on enlevait le conducteur A, seulement il y en aurait moins qu'après avoir touché le point C.

Au moment où le conducteur A agit sur BC pour y séparer les deux électricités, celles-ci réagissent à leur tour sur le fluide de A, et comme l'électricité négative qui est en B produit un effet prépondérant à cause de sa distance plus petite, elle attire le fluide positif de A sur les points les plus rapprochés. La distribution se trouve donc modifiée par réaction sur le corps inducteur, et il y a en regard deux électricités contraires accumulées en A et B.

Cas d'un conducteur électrisé. — Jusqu'à présent nous avons supposé que le conducteur soumis à l'influence était originairement à l'état naturel. Il faut maintenant examiner l'action réciproque de deux conducteurs chargés tous deux d'électricités semblables ou contraires.

1° Supposons que ce soient deux sphères qui aient été d'abord mises en contact, chargées en commun, et ensuite éloignées (*fig.* 231). Alors l'in-

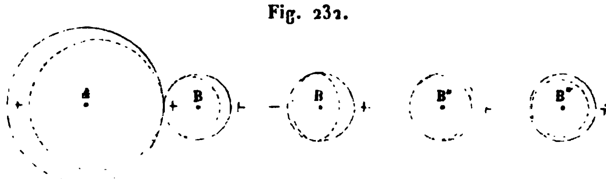
Fig. 231.



fluence réciproque changeant d'intensité, on voit se produire en B' (*fig.* 232) de l'électricité négative sur la partie qui regarde A, et de la positive au point opposé. La distance continuant à augmenter, la petite sphère arrive à une position déterminée B'' où elle n'a plus que de l'électricité positive et se retrouve à l'état naturel aux parties les plus voisines de A, comme au moment où le contact avait lieu. Quand, enfin, elle est en B''' et au delà,

elle est chargée positivement dans tous ses points, mais inégalement. Ainsi, l'influence augmente jusqu'en B' pour diminuer ensuite indéfiniment.

Fig. 232.



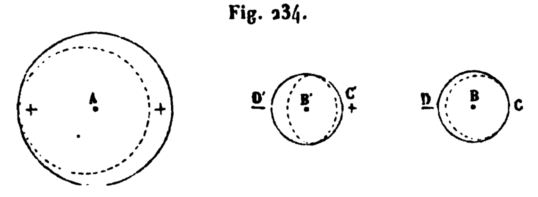
2° Les deux sphères ont reçu séparément, sans être mises au contact, des quantités quelconques de fluide de même nom; dès lors, l'une d'elles en possède moins qu'elle n'en prendrait si on les faisait toucher : supposons que ce soit B. Il y a toujours une position B (*fig.* 233) pour laquelle

Fig. 233.

tout le fluide est concentré vers C et a abandonné la partie D qui est en regard de A. Quand la distance diminue jusqu'en B', l'influence augmente en énergie, et il se fait une décomposition de fluide neutre qui amène de l'électricité négative en D' et ajoute du fluide positif en C'. Alors il y a une ligne moyenne entre C' et D'.

3° Quand les deux sphères sont chargées d'électricités contraires en quantité quelconque, il y a toujours attraction entre les charges qui tendent à s'accumuler sur les faces en regard; en B (*fig.* 234) tout le fluide a quitté

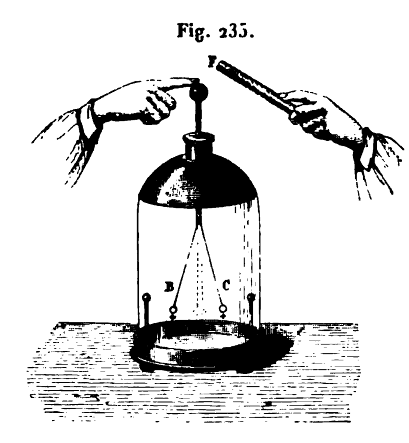
Fig. 234.



le point opposé C. En rapprochant B, une décomposition secondaire aura lieu et l'on trouvera de l'électricité positive en C', négative en D'; celle-ci sera plus abondante que celle-là, et la ligne moyenne se placera généralement entre le centre et le point C'.

Électroscopes. — Une cloche de verre portée sur un plateau métallique communiquant avec le sol (*fig.* 235) reçoit dans sa tubulure une tige terminée extérieurement par un bouton et qui soutient à l'intérieur deux petites bandes d'or B, C, découpées dans une feuille à dorure. On vernit à la gomme laque le haut de la cloche, on sèche l'intérieur avec de la chaux vive qu'on y laisse en permanence, et enfin on fixe sur la base, vis-à-vis les lames d'or, deux petites colonnes métalliques qui sont reliées au sol. On voit de suite que la cloche est un support isolant, que de plus elle maintient l'air intérieur dans un état permanent de siccité, et qu'enfin elle prévient toutes les agitations anormales de l'appareil. Toutes les fois qu'on électrisera le bouton extérieur, les lames divergeront, et les deux colonnes métalliques augmenteront la divergence.

Fig. 235.



Pour électriser cet appareil, on approche un bâton de verre électrisé F, il attire le fluide négatif et repousse le positif dans les lames qui s'écartent : si à ce moment on touche le bouton avec le doigt, on fait écouler le fluide positif, les lames se rapprochent et il ne reste que l'électricité négative sur le bouton. Après cela, on enlève d'abord le doigt, ce qui rétablit l'isolement, ensuite le bâton, ce qui rend libre l'électricité accumulée sur le bouton, et l'on voit les lames diverger ; elles sont chargées négativement.

Maintenant approchons progressivement du bouton un corps électrisé : s'il est négatif, il repoussera le fluide dans les lames et augmentera leur divergence ; s'il est positif, il les rapprochera, les amènera au contact, et les séparera de nouveau par une décomposition secondaire ; enfin s'il est à l'état naturel il ne fera que les rapprocher. Réciproquement on reconnaîtra l'état électrique d'un corps approché, suivant qu'il aura produit l'un des trois effets précédents.

Cas des corps mauvais conducteurs. — Nous étudierons successivement les cas où un corps isolant est soumis à l'influence d'une source électrique : 1° à distance ; 2° en contact pendant peu de temps ; 3° en contact pendant longtemps.

1° Matteucci suspendit par un fil de cocon de petites aiguilles de soufre, de résine ou de gomme laque, et approcha d'elles un corps électrisé A : à l'instant elles se dirigèrent vers lui en exécutant des oscillations autour de leur position d'équilibre. Tant que dura l'influence, elles donnèrent des signes électriques, contraires à ceux du corps inducteur à leur bout le plus rapproché de lui, et de même sens à leur extrémité la plus éloignée. Aussitôt que l'on éloigna le corps électrisé A, les aiguilles revinrent instantanément à l'état naturel. Ces effets sont identiques à ceux que montrent les corps conducteurs.

Cependant, le mode de distribution électrique n'est point le même dans les deux cas. Pour savoir ce qui se passe ici, considérons le cas hypothétique où l'on aurait une suite de conducteurs très-petits et très-voisins A, B, C, D, E (*fig.* 236). A l'instant où nous placerons en avant de A un corps

Fig. 236.

+A− +B− +C− +D− +E−

électrisé négativement, les fluides neutres se décomposeront tout le long de la série, chaque extrémité antérieure se chargera positivement et chaque bout postérieur négativement; les fluides de noms contraires détruiront leurs actions dans les intervalles de deux conducteurs voisins, et l'effet total de la série de corps sera sensiblement réduit à celui des électricités positive et négative qui se trouvent aux deux bouts A et E. Or, pour expliquer l'influence exercée sur les corps isolants, on admet que chacune de leurs molécules se conduit comme chacun des conducteurs A, B, C,..., et l'on dit qu'elles sont *polarisées*.

2° Quand un corps inducteur électrisé A touche une substance isolante, l'effet que nous venons d'analyser se produit d'abord; mais quand l'action se prolonge, le mode de distribution change. Les fluides de nom contraire à A attirés par lui et les fluides de même nom qui sont repoussés se déplacent peu à peu sur la substance, qui n'est jamais absolument isolante, et bientôt les points en contact avec A sont électrisés positivement, s'il est négatif; les parties plus éloignées ont l'électricité négative, et ces charges électriques persistent après l'éloignement du corps inducteur.

Cette explication est confirmée par une expérience qu'on doit à Matteucci. Ayant formé une pile de lames minces de mica superposées et pressées, il arma les faces extrêmes de deux conducteurs métalliques et fit communiquer l'un avec la machine électrique, pendant que l'autre touchait au sol. Au bout de quelque temps, il sépara les lames qu'il trouva toutes électrisées d'une manière permanente, savoir : négativement sur la face qui re-

gardait le conducteur positif, et positivement sur la surface opposée. Chacune des lames de mica avait donc subi le genre de décomposition que nous venons de décrire.

Il faut remarquer que, malgré le contact, la transmission du fluide ne se fait pas d'un corps conducteur à un corps isolant, ni réciproquement. Pour le prouver, on électrise par frottement un gâteau de résine, qui devient négatif, et l'on dépose sur sa surface un plateau métallique; celui-ci subit la décomposition par influence sans recevoir d'électricité par communication, car si l'on touche sa surface supérieure, on reçoit une étincelle négative, et si après cela on le soulève avec un manche isolant, il est chargé positivement, c'est-à-dire d'une électricité contraire à celle du gâteau.

3° Quand l'expérience est prolongée davantage, ces effets d'induction disparaissent et la communication électrique directe se fait entre le corps chargé et la substance isolante; ainsi les isoloirs des machines électriques prennent de l'électricité positive dans toute leur étendue; ainsi les lames de mica superposées finissent par être toutes chargées positivement sur leurs deux faces.

Cette transmission lente se fait par la masse entière des mauvais conducteurs. On touche une machine électrique par un bâton de résine, qui finit par devenir positif dans une grande longueur; après cela on le frotte avec une étoffe de laine, ce qui le rend négatif. Abandonné à lui-même il redevient neutre, puis reprend de l'électricité positive, ce qu'on peut expliquer en supposant que cette électricité, primitivement fournie par la machine, a pénétré dans le corps, qu'elle a été ensuite recouverte de fluide négatif par le frottement, et que peu à peu elle revient de l'intérieur à la surface. Un cube de spermacéti ou de stéarine est d'abord électrisé par la machine. Quand l'action a duré pendant longtemps, on le lave à l'alcool, ce qui lui enlève toute électricité; mais quelque temps après elle revient de l'intérieur et reparaît à la surface.

II. — THÉORIE DE L'ÉTINCELLE.

Formation de l'étincelle. — Quand on approche une sphère B d'un conducteur électrisé A (*fig.* 234, p. 273), l'influence de A amène du fluide négatif en B, et la réaction de celui-ci sur A accumule du fluide positif en regard. Il y a donc en présence sur A et B des charges électriques de nom contraire dont les épaisseurs croissent à mesure que leur distance diminue et dont les molécules, qui se repoussent mutuellement, tendent à s'échapper

à travers l'air, à peu près comme un gaz enfermé dans un vase presse contre les parois opposées qui le retiennent. De là le nom de *pression* ou *tension* électrique donné à l'effort exercé par l'électricité. Le calcul montre que cette tension varie comme le carré de l'épaisseur de la couche électrique. Il y a donc aux parties en regard des deux corps A et B deux fluides contraires qui tendent isolément à s'échapper à travers l'air; de plus ils exercent de l'un à l'autre une attraction qui augmente encore l'effort qu'ils font pour se réunir.

D'un autre côté, la résistance opposée par l'air diminue à mesure que l'on rapproche les conducteurs; elle finit par devenir moindre que l'effort croissant des molécules électriques pour se recombiner; alors elles s'échappent brusquement et se réunissent avant que le contact ait lieu. C'est cette réunion brusque qui produit l'étincelle.

Après cette étincelle, et le contact étant établi, une partie de l'électricité positive de A aura reproduit du fluide neutre avec une quantité équivalente de l'électricité négative qui était en B, et il restera sur B une proportion de fluide positif égale à celle qui a disparu de A. Le résultat est donc le même que si cette proportion avait passé de A sur B par communication; mais on voit que réellement il n'y a pas eu de partage entre les deux corps, que l'électrisation par contact a été précédée et préparée par une influence électrique à distance, et que l'étincelle est la manifestation physique de la réunion à travers l'air des deux fluides contraires.

Comment varie l'étincelle. — Cette théorie explique de nombreuses particularités. Quand le corps approché d'une source électrique est bon conducteur, mais isolé, l'étincelle est nette, mais petite; elle est beaucoup plus bruyante et plus longue s'il est en communication avec le sol : c'est qu'alors la masse de fluide accumulée par l'influence avant l'explosion était plus considérable. On prévoit également que plus les surfaces opposées seront larges, plus l'étincelle sera forte, car les quantités de fluide qui sont séparées par l'induction augmentent avec la dimension des corps qui sont en regard. Tous ces phénomènes changent quand le corps que l'on oppose à la source électrique est mauvais conducteur. Dans ce cas, l'influence se réduit à polariser toutes les molécules du corps isolant; il y a bien encore sur les parties voisines une électricité contraire à celle du corps inducteur, mais elle est localisée sur chaque élément, et ce n'est pas une étincelle unique qui peut décharger ces parties, mais une série d'étincelles élémentaires dirigées vers chaque point : c'est, en effet, ce que l'on observe. Si, par exemple, on promène sur un gâteau de résine des conducteurs électrisés positivement et négativement, on entend des décré-

pitations, et l'on communique aux points touchés l'électricité positive et négative. En projetant ensuite sur le gâteau une poudre composée de minium et de fleur de soufre, on voit le minium adhérer aux points négatifs, le soufre aux parties positives, et révéler des dessins bicolores qui portent le nom de *figures de Lichtemberg*.

Propriétés de l'étincelle. — On ne sait de quel côté vient l'étincelle

Fig. 237.



Fig. 238.

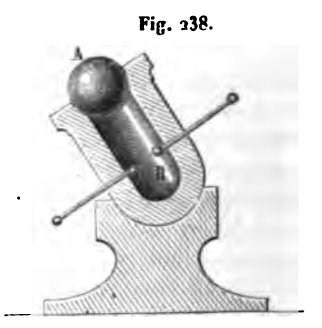
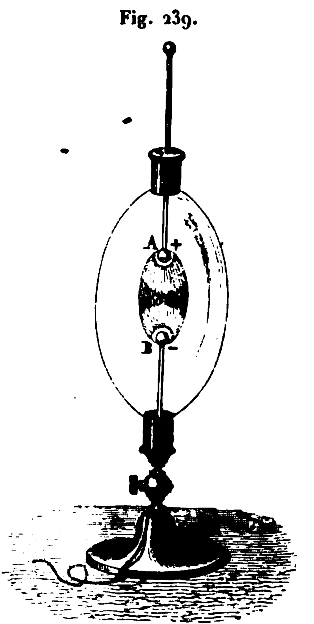


Fig. 239.



et vers quel point elle va, ni quelle est la cause du bruit qu'elle fait, ni ce qui produit la lumière. Pour résoudre ces questions, il faudrait d'abord avoir une idée nette de l'électricité, et nous sommes loin d'en être arrivés là. Quand on sait si peu de chose, il faut se contenter de recueillir toutes les circonstances qui peuvent nous instruire. C'est ce que nous allons faire.

L'étincelle est rectiligne quand elle est courte. Si elle est longue, elle

est sinueuse comme un éclair, et quelquefois se sépare en plusieurs branches. Sa couleur varie du pourpre au blanc bleuâtre; elle dépend des métaux entre lesquels elle part, et des gaz dans lesquels elle passe. Elle augmente la température des milieux où elle se produit; elle projette les liquides; elle dilate l'air. On démontre ces faits par les appareils ci-dessus.

Le thermomètre de Kinerseley est un vase fermé (*fig.* 237), contenant de l'eau et de l'air, dans lequel on fait passer en A une étincelle, qui projette le liquide par un tube communiquant B. Le mortier électrique (*fig.* 238) permet de lancer une bille A par la dilatation de l'air contenu dans B au moment où l'on y produit une forte étincelle.

Dans le vide des machines pneumatiques, l'étincelle n'est plus un trait net, linéaire et brillant, mais une lueur rougeâtre, peu vive et qui s'étale. L'expérience se fait avec l'œuf électrique (*fig.* 239), ou avec un tube de 2 mètres de long, vidé d'air et muni de conducteurs, comme l'œuf électrique; les lueurs, qui rappellent les jeux de l'aurore boréale, semblent suivre la main quand on la promène extérieurement sur le tube. Elles montrent qu'à haute tension l'électricité s'échappe instantanément dans l'air raréfié. Nous les étudierons avec plus de détails après l'induction.

Expériences diverses. — On fait dans les cours de nombreuses expé-

Fig. 240.

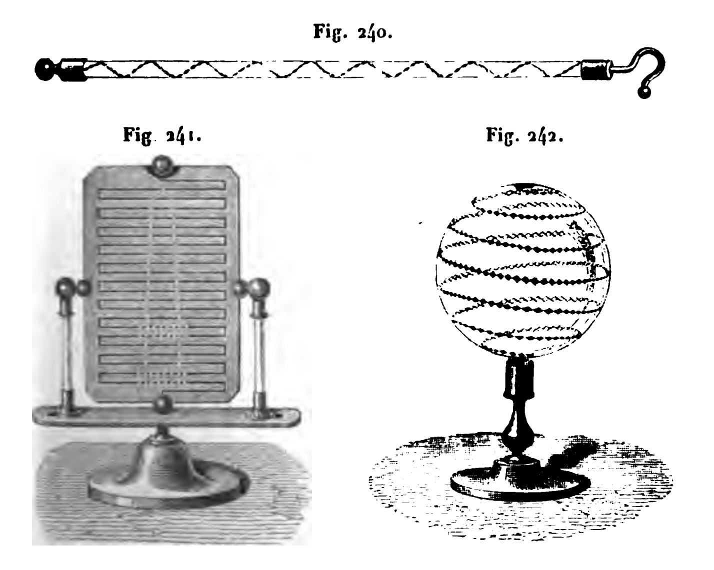


Fig. 241. Fig. 242.

riences avec des appareils dits *étincelants*. Ce sont des surfaces de verre

sur lesquelles on a collé des séries linéaires de petites lames métalliques voisines qui forment des dessins variés. La première de ces lames reçoit d'une machine une charge électrique qui se transmet instantanément tout le long de la série en donnant une étincelle à chaque interruption. Toutes éclatent à la fois, et comme elles se renouvellent après des intervalles très-rapprochés, l'illumination paraît continue. On voit dans les *fig.* 240 et 242 le tube et le globe étincelants. Quelquefois on couvre un carreau de verre (*fig.* 241) de petites bandes linéaires d'étain laminé qui s'étendent sans interruption depuis une sphère supérieure que l'on réunit à la machine jusqu'à une autre boule qui se joint au sol. On dessine sur le carreau une figure quelconque, et l'on coupe avec un canif les lignes conductrices sur le contour de cette figure; quand on fait passer l'électricité, chacune des coupures où se trouve une interruption du conducteur s'illumine par une étincelle, et l'ensemble des points éclairés dessine dans l'obscurité l'objet que l'on a voulu représenter.

III. — THÉORIE DES MOUVEMENTS ÉLECTRIQUES.

Cas des mauvais conducteurs. — L'attraction des corps légers est aussi un phénomène d'influence. Supposons d'abord qu'un pendule soit mauvais conducteur. Quand il est chargé, l'électricité adhère à sa surface; elle est repoussée ou attirée si on lui présente un autre corps électrisé, et les molécules auxquelles elle adhère, c'est-à-dire le pendule lui-même, s'écartent ou se rapprochent du corps électrisé.

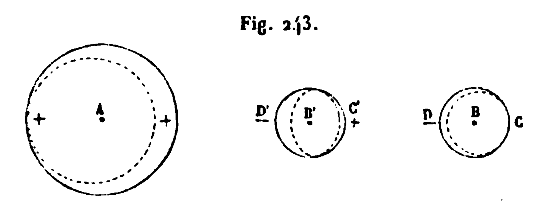
Quand ce pendule, toujours mauvais conducteur, est à l'état naturel, il subit d'abord la décomposition polaire dont nous avons parlé; chaque molécule prend un pôle de nom contraire au corps inducteur à son extrémité la plus rapprochée, un pôle de même nom au bout le plus éloigné; toutes sont attirées individuellement, et leur ensemble, c'est-à-dire le pendule tout entier, se rapproche du corps inducteur. Mais, une fois le contact établi, il n'y a pas de répulsion immédiate, car la balle non conductrice garde une électricité contraire à celle de l'inducteur, même sur les points qui le touchent. A la longue, elle se charge, par communication, de la même électricité que l'inducteur, et alors elle est repoussée.

Cas des bons conducteurs. — Quand le pendule est conducteur et isolé, il faut distinguer trois cas.

1° Supposons le corps fixe en A et positif, le pendule en B et négatif

(*fig.* 243); les fluides s'attireront et s'accumuleront sur les faces qui se regardent. Maintenus entre la surface des corps A et B et l'air qui les enveloppe, ils tendront à se rapprocher, et ne pourront le faire sans entraîner le pendule. Aussitôt le mouvement commencé, la distribution change,

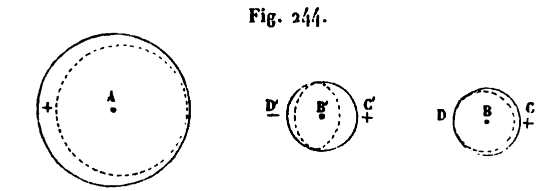
Fig. 243.



l'influence augmente, l'accumulation des fluides contraires s'accroît sur les parties les plus voisines, la balle est entraînée, et le contact a lieu. Aussitôt après, le pendule a pris du fluide positif, et il est repoussé, comme nous allons le voir.

2° Représentons par A et B (*fig.* 244) le corps inducteur et le pendule, les fluides de même nom dont ils sont chargés commenceront par s'accumuler sur les surfaces les plus éloignées des deux conducteurs. Une fois

Fig. 244.



qu'ils sont ainsi disposés et confinés sous les enveloppes d'air qu'ils ne peuvent franchir, ils continuent de se repousser et entraînent le pendule qu'ils ne peuvent quitter. Mais là ne se bornent pas les effets que l'on peut avoir à observer. Si l'on rapproche le pendule jusqu'en B′, on déterminera, par une influence plus énergique, une décomposition secondaire du fluide neutre, et l'on aura en D′ de l'électricité négative qui sera attirée et en C′ du fluide positif qui sera repoussé. Ce dernier est, à la vérité, plus abondant que le premier; mais, d'un autre côté, sa distance au corps inducteur est plus grande : il y aura une position pour laquelle, attraction et répulsion devenant égales, le pendule sera en équilibre. A partir de là, si le rapprochement continue, la répulsion se change en attraction.

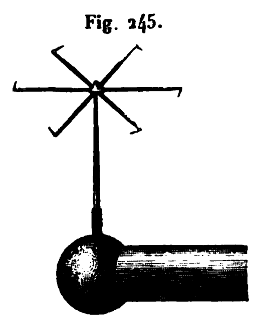
3° Le cas où le pendule serait à l'état naturel s'explique de même. L'influence du corps inducteur décomposant le fluide neutre, mais le plus

rapproché étant plus attiré que l'autre n'est repoussé, le pendule est entraîné vers le corps inducteur.

Tourniquet électrique. — Nous avons vu qu'à l'extrémité des pointes la tension était très-considérable et produisait un *vent électrique* qu'on explique en admettant que les molécules d'air s'électrisent, puis sont repoussées et remplacées par d'autres qui s'électrisent à leur tour et suivent les premières.

Or si à l'extrémité d'une pointe électrisée il y a une action qui chasse l'air, il y a nécessairement une réaction qui repousse la pointe en sens opposé; et si elle est libre, elle doit reculer. On le prouve par le tourniquet électrique (*fig.* 245). Il se compose d'une chape centrale sur laquelle sont fixés des rayons divergents recourbés dans le même sens à leur extrémité et terminés en pointe aiguë; la chape se place en équilibre sur un pivot communiquant avec une machine électrique, et quand on charge celle-ci, les reculs de toutes les pointes font tourner le moulinet. Il marche indéfiniment dans l'air libre, mais sous une cloche il s'arrête après un certain temps, probablement parce que les parois du verre sont alors électrisées.

Fig. 245.



Expériences diverses. — Voici quelques expériences qui mettent en évidence, avec une grande variété de détails, l'attraction et la répulsion des corps légers; elles sont fondées sur un principe commun : c'est toujours un corps léger mobile qui est placé entre deux conducteurs, l'un chargé et l'autre communiquant au sol; ce corps est d'abord attiré par le premier conducteur jusqu'à le toucher, et après ce contact, où il a reçu de l'électricité, il est repoussé vers le conducteur neutre; ramené alors à son état et à sa position première, il recommence le même mouvement de va-et-vient tant qu'il y a de l'électricité pour le produire.

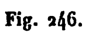
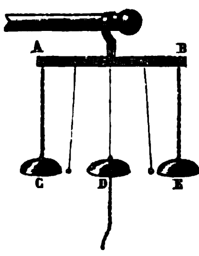


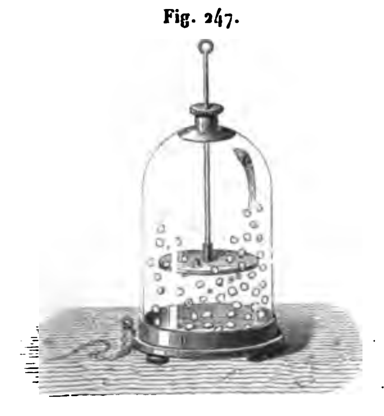
Fig. 246.



La *fig.* 246 représente le carillon électrique : on y voit deux timbres extrêmes C et E électrisés par la machine, et un troisième D, qui est en relation avec le sol. Les corps qui oscillent entre les premiers et le dernier sont deux pendules métalliques isolés par un fil de soie : à chaque mouvement, ils viennent frapper et font sonner les timbres.

L'appareil représenté dans la *fig.* 247 avait été imaginé par Volta pour représenter le mouvement dont il supposait que la grêle est animée entre deux nuages électrisés différemment. L'un de ces nuages est figuré par le plateau A qui est électrisé, l'autre par le fond B du vase qui touche au sol, et les grêlons sont représentés par des balles de sureau; elles vont et viennent rapidement entre les deux plateaux. On donne quelquefois à cette expérience une autre forme en plaçant entre A et B une figurine artistement taillée dans un morceau de moelle de sureau, lestée par la base, et qui, se tenant debout pendant qu'on électrise A, exécute une danse régulière entre A et B.

Fig. 247.



CHAPITRE IV.

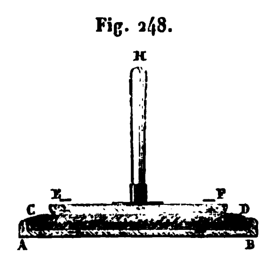
MULTIPLICATION ET CONDENSATION DE L'ÉLECTRICITÉ.

I. — MULTIPLICATEURS ÉLECTRIQUES.

Quand on a développé sur un corps une charge si minime qu'elle soit d'électricité, elle peut par influence donner naissance à des quantités indéfinies de fluide contraire.

Électrophore. — Soit CD (*fig.* 248) un gâteau de résine. On le frotte avec une peau de chat et on l'électrise négativement. On place au-dessus un plateau conducteur isolé EF que nous supposerons très-mince. Par influence il se charge positivement à sa base, négativement à son sommet. Quand l'équilibre est atteint, il existe entre les deux surfaces du plateau un plan neutre déterminé par cette condition, qu'une molécule de fluide positif est également attirée par le fluide négatif supérieur et par la différence du fluide négatif et du fluide positif qui sont au-dessous. Le fluide négatif du gâteau est donc en excès.

Fig. 248.



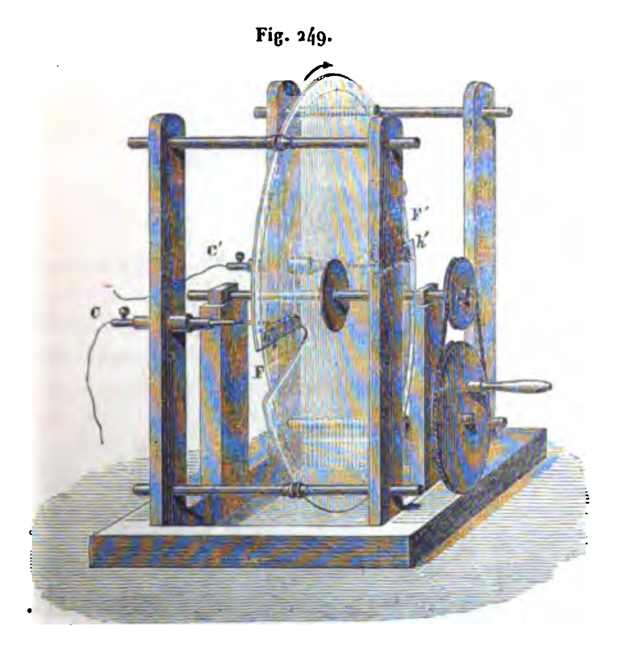
On touche maintenant le sommet du conducteur, ce qui enlève le fluide négatif. A ce moment il faut que les deux électricités positive et négative du plateau et du gâteau n'aient plus d'action sur ce sommet, ce qui exige que le fluide positif ait augmenté à la base du plateau.

On enlève ensuite le plateau. Le fluide positif devient libre, il se répand sur toute la surface et donne une étincelle quand on approche un conducteur.

On replace le plateau sur le gâteau et l'on recommence la même opération autant de fois qu'on le veut. Ainsi la petite quantité de fluide négatif du gâteau suffit à produire des quantités indéfinies d'électricité contraire.

Multiplicateur de Holtz. — Voici une machine d'invention récente qui agit comme un électrophore continu. En *h* (*fig.* 249) se trouve une feuille de papier collée sur une lame de verre fixe ; on la charge positivement en la touchant avec un verre frotté. Vis-à-vis est un plateau de verre

Fig. 249.



FF', verni à la gomme laque, qu'on fait tourner rapidement, et derrière ce plateau un peigne isolé communiquant avec un conducteur C. Le fluide positif de *h* attire le négatif sur le peigne et repousse le positif sur le conducteur C qui le garde. Mais l'électricité négative ne reste pas sur le peigne à cause des pointes dont il est garni ; elle s'échappe, est arrêtée par le plateau F et est entraînée dans son mouvement. Elle arrive vis-à-vis d'un autre peigne C'*h'*, elle attire du fluide positif, retourne à l'état neutre et charge négativement le conducteur C'. Il est évident que la continuation du mouvement produira indéfiniment le même effet et que l'on obtiendra des quantités indéfinies de fluide positif et négatif.

En *h'* est un autre morceau de papier qui se charge négativement et qui devient à son tour l'origine d'un nouveau développement d'électricité.

Ces papiers sont tous deux suivis de fenêtres percées dans le plateau fixe pour empêcher toute sa surface de s'électriser de la même manière.

Le fluide qu'on a mis en *h* persiste tant que la machine fonctionne, mais disparaît aussitôt qu'elle se repose, et il faut à chaque instant réamorcer la machine. On peut éviter cet inconvénient par des modifications simples de l'appareil primitif : nous citerons la machine de M. Carré (*fig.* 250).

Fig. 250.



Un premier plateau de caoutchouc durci AA est mis directement en rotation par une manivelle ; il est frotté par une paire de coussins C. Vis-à-vis de lui se trouve un plateau multiplicateur AB tournant rapidement en face des peignes D et F qui communiquent avec les conducteurs L et *ff*. Le jeu et l'explication sont les mêmes que dans l'appareil de Holtz : le plateau AA chargé positivement décompose le fluide de DL, attire l'électricité négative qui se place sur le plateau multiplicateur AB, et repousse la positive en L ; par le mouvement de AB, le fluide négatif arrive en face de F qui cède de l'électricité positive tandis que la négative se rend en *ff*.

Ces machines sont incomparablement plus puissantes que les anciennes. Entre les deux armatures de noms contraires on voit des étincelles presque

continues, à des distances de 15 ou 20 centimètres. Elles sont même supérieures à la machine d'Armstrong.

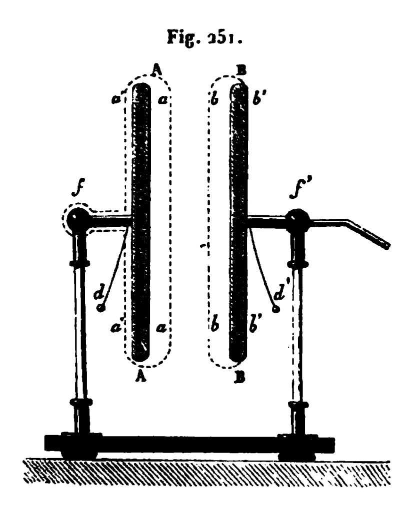
Mais il ne faut pas croire qu'on obtienne sans aucune dépense ces quantités indéfinies d'électricité. Le travail nécessaire pour faire tourner le multiplicateur de Holtz augmente considérablement aussitôt que la machine produit des étincelles. L'électricité, comme la chaleur, est une forme encore inconnue du travail.

II. — CONDENSATEURS ÉLECTRIQUES.

Condensateur à lame d'air. — Deux plateaux métalliques isolés A et B (*fig.* 251) peuvent se mettre en communication, l'un avec le sol, l'autre avec la machine électrique; ils sont munis de pendules *d* et *d'*.

J'éloigne le conducteur B, je mets A en communication directe avec la machine et je lui donne toute l'électricité qu'il peut en recevoir; on peut admettre, sans erreur sensible, qu'il y en aura autant sur la face antérieure *aa* que sur la face postérieure *a'a'*. Cela étant, j'approche le conducteur B. Alors tous les phénomènes connus de l'influence vont se manifester : le fluide neutre de B se décomposera, le négatif s'accumulera sur la face *bb*, le positif sur *b'b'* et sur *f'*, et le pendule *d'* s'élèvera. D'un autre côté, les électricités répandues sur B réagiront sur celle de A, et l'attireront; elle s'accumulera sur *aa*, et le pendule *d* devra s'abaisser. Tout cela est conforme à l'expérience.

Fig. 251.



Mettons la sphère *f'* en communication avec le sol; le fluide positif disparaît, le pendule *d'* retombe sur *b'b'*, et une nouvelle décomposition ramène une nouvelle quantité d'électricité négative sur *bb*. Celle-ci exerce une réaction sur A, une certaine quantité de fluide positif se transporte

sur *aa*, abandonne la face *a'a'*, et le pendule *d* s'abaisse de nouveau presque jusqu'à être vertical.

Il résulte de là une conséquence importante, c'est que le bouton *f* et la face *a'a'*, qui avaient été chargés à refus, sont presque ramenés à l'état naturel, et que, si on les met de nouveau en contact avec la machine, ils en pourront recevoir une nouvelle quantité d'électricité. Supposons qu'on leur donne une seconde charge, elle éprouvera le même sort que la première, déterminera une nouvelle décomposition sur B, amènera en *bb* une nouvelle quantité de fluide négatif et, par la réaction de celui-ci, viendra s'accumuler en partie sur la face *aa*.

On pourra conséquemment recommencer la même opération un nombre indéfini de fois; chaque charge se partagera en deux parties : l'une qui se condensera en *aa*, l'autre qui restera sur le bouton *f* et sur la face *a'a'*, et cette dernière partie s'ajoutant à chaque opération, le pendule *d* s'élèvera progressivement jusqu'à la hauteur où il arrive quand le plateau A est directement chargé par la machine sans subir l'action de B : à ce moment la limite sera atteinte.

Au lieu de charger l'appareil par des opérations successives, il est clair qu'on peut maintenir le bouton *f* en communication constante avec la source et *f'* en relation avec le sol; il se fera sur le plateau A une accumulation considérable de fluide positif, sur le plateau B une condensation un peu moindre de fluide négatif.

On nomme *force condensante* le rapport de la charge totale que reçoit le plateau A quand il est influencé par B à celle qu'il recevrait s'il était seul.

Expression approchée de la force condensante. — Désignons par — B et A les quantités totales de fluide négatif et positif répandues sur les plateaux B et A, quand l'état de saturation est atteint. Nous pouvons poser

$$-B = mA,$$

m étant un facteur constant plus petit que l'unité et qui augmente quand la distance diminue. Isolons maintenant le conducteur B, et touchons A; nous enlèverons toute l'électricité de la face extérieure *a'a'* et une portion de celle qui était sur *aa*. On admet que cette couche enlevée avait la même épaisseur sur les deux faces et qu'elle est égale à la quantité totale d'électricité que la machine fournit à A quand B est éloigné et qu'il n'y a pas de condensation. Nous la désignerons par α.

A ce moment les deux plateaux ont changé de rôle; mais le rapport des charges est resté le même, et l'on a

$$A - \alpha = -mB,$$

ou, en remplaçant — B par sa valeur,

$$A - \alpha = m^2 A, \quad A(1 - m^2) = \alpha, \quad \frac{A}{\alpha} = \frac{1}{1 - m^2}.$$

$\frac{A}{\alpha}$ est la force condensante. Elle est d'autant plus grande que m est plus voisin de l'unité. L'expérience prouve qu'elle augmente en raison inverse de la distance.

Décharges par contacts successifs. — Examinons les pertes des deux plateaux quand on les mettra alternativement en contact avec le sol. Si nous touchons A, nous lui enlèverons une charge

$$\alpha = A(1 - m^2),$$

et nous lui laisserons

$$A - \alpha = m^2 A.$$

En touchant B, il perdra

$$\beta = B(1 - m^2) = - A m(1 - m^2)$$

et gardera

$$B - \beta = m^2 B = - m^3 A.$$

Après ces deux contacts, les charges des deux plateaux sont devenues $m^2 A$, $m^2 B$; elles ont diminué dans le rapport de 1 à m^2. Après n contacts, elles seront donc

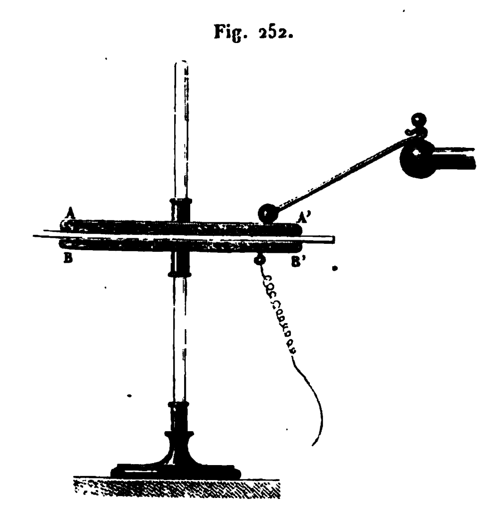
$$A m^n \quad \text{et} \quad B m^n = - A m^{n+1}.$$

Elles décroissent en progression géométrique et ne deviennent nulles qu'après un nombre infini de contacts.

Si l'on vient à réunir par un arc conducteur les deux faces du condensateur, la totalité des deux fluides se précipite à travers la communication pour recomposer du fluide neutre; il en résulte une étincelle extrêmement forte et des phénomènes nombreux que nous allons bientôt étudier.

Condensateur à lame de verre. — Pour obtenir des charges considérables, il faudrait rapprocher beaucoup les deux plateaux AA′ et BB′, et, si on le faisait, les électricités se recombineraient à travers l'air. On évite cet inconvénient en interposant entre eux un corps isolant plus résistant, comme le verre ou la résine (*fig.* 252). Mais alors les deux électricités positive et négative qui s'attirent ne restent point sur les plateaux AA′ et BB′, elles s'accumulent sur les deux faces du verre interposé. Pour le démontrer, nous romprons d'abord la communica-

Fig. 252.



tion de AA′ avec la machine et de BB′ avec le sol, puis nous enlèverons le plateau AA′ par son manche isolant, et enfin le verre en le tenant par ses bords, et nous verrons que les plateaux ne retiennent que des quantités d'électricité à peine appréciables. Mais si, après les avoir déchargés, on remet le verre sur BB′, et AA′ sur le verre, et qu'on réunisse ensuite AA et BB′ par un arc métallique, on obtiendra une décharge aussi vive que si l'on n'avait pas d'abord séparé les appareils. Les électricités condensées étaient donc demeurées sur le verre. Le rôle des conducteurs AA′ et BB′ se borne à les amener sur les deux faces du verre, à les y laisser et à les ramener quand on décharge l'appareil.

L'expérience se fait plus commodément avec un bocal de verre, à l'intérieur et à l'extérieur duquel on place deux armatures en fer-blanc A et B, qui sont les deux conducteurs (*fig.* 253).

Fig. 253.



Si l'on électrise A en mettant B en communication avec le sol, on obtient tous les effets des condensateurs à surface plane. Quand l'appareil est chargé, on le dépose sur une surface isolante, puis enlevant d'abord A avec un crochet de verre, ensuite le bocal M, on ne trouve que très-peu d'électricité sur les armatures métalliques, tandis qu'en saisissant l'extérieur du verre avec une main et plongeant l'autre dans son intérieur, on entend une série d'étincelles et on reçoit une série de commotions.

Franklin versait dans le vase M une certaine quantité d'eau, qui remplaçait l'armature intérieure A, et il plongeait le tout dans un baquet contenant encore de l'eau qui constituait le conducteur extérieur B. Quand l'appareil avait été chargé, il l'enlevait et vidait le liquide intérieur; il remettait ensuite à l'intérieur et à l'extérieur de l'eau qui n'avait point été électrisée, et la charge de l'appareil n'avait pas diminué.

Non-seulement les électricités opposées se pressent contre les deux surfaces du corps isolant, mais elles pénètrent dans son intérieur; on forme un condensateur avec une plaque de gomme laque comprise entre

deux armatures métalliques mobiles; on le charge, et on le maintient chargé pendant longtemps. On réunit ensuite les armatures par un arc métallique qui les ramène à l'état naturel; on les enlève rapidement, et l'on examine le plateau de gomme laque. On trouve d'abord qu'il n'est point électrisé; mais peu à peu ses deux faces accusent chacune l'électricité du plateau qui les touchait pendant que l'appareil était chargé. Elle avait donc pénétré dans la gomme laque pendant la première phase de l'expérience et revenait à la surface pendant la seconde. Cela explique le phénomène suivant connu depuis longtemps : si l'on décharge un condensateur de grande dimension en touchant ses armatures avec un arc métallique, il conserve un résidu électrique qui devient sensible quelque temps après et que l'on peut enlever par un deuxième contact, c'est l'électricité qui revient après avoir pénétré dans le verre.

III. — EFFETS DES CONDENSATEURS.

Bouteille de Leyde. — Batteries. — Le condensateur peut avoir des formes très-diverses. Il est toujours constitué par deux conducteurs opposés que sépare une lame isolante ; mais cette lame peut être plane ou courbe. On peut se servir d'une bouteille et placer les deux armatures à l'extérieur et à l'intérieur. C'est sous cette forme que le condensateur fut découvert par hasard, à Leyde, en 1746, par Cuneus et Musschenbroeck. Cuneus voulait électriser de l'eau dans un flacon qu'il tenait d'une main, et, à cet effet, il y avait plongé une tige métallique qu'il fit communiquer avec une machine électrique. Il voulut ensuite enlever la tige avec l'autre main restée libre : à ce moment, il fit communiquer l'eau, qui est l'armature intérieure du flacon, avec la main qui le tenait et qui était l'armature extérieure, et, les deux électricités accumulées se recombinant à travers les bras et le corps, Cuneus reçut une commotion extrêmement vive. Musschenbroeck, après l'avoir éprouvée à son tour, en fut assez effrayé pour écrire qu'il ne recommencerait pas pour le royaume de France, et il fit la plus sinistre description des effets qu'il avait ressentis ; mais cet effroi n'arrêta personne, et l'on se fit bientôt un amusement de ce qu'il avait tant redouté.

Depuis cette époque, l'instrument de Cuneus a conservé le nom de *bouteille de Leyde*. On remplit aujourd'hui l'intérieur avec des feuilles minces de cuivre ou d'or, ce qui évite l'humidité; on colle une lame d'étain à l'extérieur et l'on vernit à la cire d'Espagne ou à la gomme laque les points

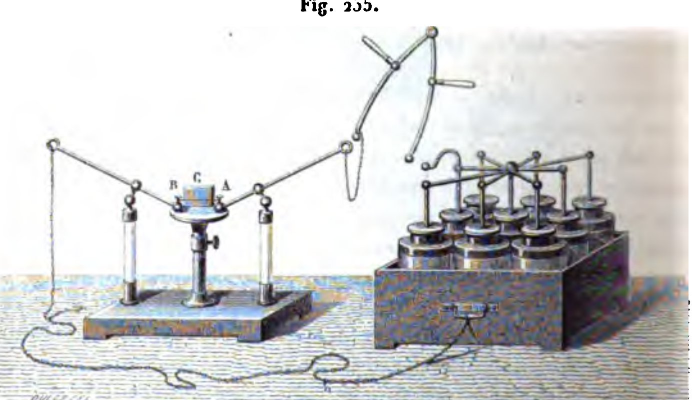
du verre qui ne sont point armés (*fig.* 254). L'électricité est amenée à l'intérieur par un gros fil de laiton recourbé qui permet d'accrocher la bouteille à la machine électrique, et le plus souvent on fixe contre le fond extérieur du flacon un crochet auquel on attache une chaîne métallique qui établit la communication avec le sol.

Fig. 254.



Comme la quantité totale d'électricité condensée est proportionnelle à l'étendue des armatures, on obtient des effets plus énergiques avec de vastes bocaux garnis intérieurement et extérieurement de feuilles d'étain. On les réunit par groupes de 4, 9, 16,... bocaux dans une caisse carrée (*fig.* 255), qui elle-même est tapissée de feuilles métalliques. Toutes les armatures extérieures communiquent à une chaîne par où l'électricité s'échappe dans le sol. D'un autre

Fig. 255.

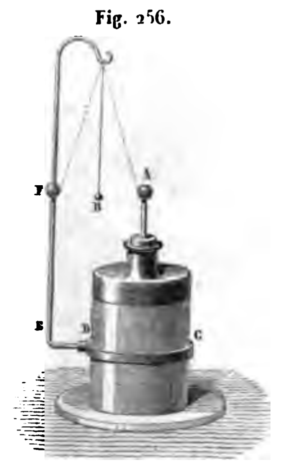


côté, toutes les tiges métalliques qui conduisent le fluide dans l'intérieur des bocaux sont reliées par de gros fils de laiton, et se terminent par un bouton unique que l'on fait communiquer avec la machine quand on veut charger l'instrument. Ces assemblages de jarres se nomment *batteries électriques*. Pour les charger, il faut que la machine ait eu le temps de fournir toute la somme d'électricité qu'elles condensent; l'équilibre est atteint quand les pertes, qui augmentent en même temps que la charge, sont devenues égales aux gains faits pendant le même temps.

Décharges électriques. — I. On peut décharger la bouteille de Leyde par contacts successifs, en la plaçant sur un support isolant et en faisant

communiquer l'extérieur avec une pièce conductrice CDEF (*fig.* 256). Un pendule isolé B est d'abord attiré par le bouton A et lui enlève du fluide positif. Repoussé par A, il est attiré par le bouton F, auquel il prend le fluide négatif rendu libre, ce qui le ramène à l'état naturel, et le mouvement de va-et-vient se continue. En mettant des timbres en A et F, on a un carillon électrique.

Fig. 256.



II. Toutes les fois qu'on réunit par un conducteur les armatures opposées d'une batterie chargée, les deux électricités accumulées se réunissent à travers le conducteur; il en résulte un mouvement électrique que l'on nomme la *décharge;* elle se fait sous la forme d'une étincelle moins longue que celles de la machine, mais qui est plus lumineuse, plus brillante et plus large.

Un observateur qui touche de ses deux mains les armatures opposées reçoit une commotion dans les membres traversés par les fluides. Si elle est faible, ce n'est qu'un choc instantané; plus forte, elle laisse des douleurs et un engourdissement prolongé; et quand elle provient de larges batteries chargées par de puissantes machines, elle foudroie les animaux de la plus grande taille.

Quand un grand nombre de personnes se tiennent par les mains pour former une chaîne et que la première et la dernière touchent les armatures, la décharge traverse toute la série et chacun reçoit une commotion; elle est plus faible au milieu qu'aux extrémités de la chaîne, parce que, toutes les personnes touchant au sol, une partie des fluides se réunit par la terre en passant par les pieds. Si tout le monde était isolé, chacun éprouverait un effet égal.

III. La décharge s'écoule à travers les corps bons conducteurs et de grande section, sans les modifier; mais quand ils diminuent en diamètre et en longueur, ils s'échauffent jusqu'à rougir, jusqu'à se fondre et même jusqu'à se volatiliser. L'expérience est représentée (*fig.* 255). Un fil d'or très-fin est fixé en AB, entre les branches d'un appareil que l'on nomme *excitateur universel,* contre une carte C. Au moment où passe la décharge, le métal rougit et disparaît, laissant une trace d'un pourpre foncé sur la carte.

On modifie l'expérience en plaçant une feuille à dorure sur une carte découpée qui représente le portrait de Franklin, et en déposant ensuite

cette carte sur une lame de verre dans une presse de bois que l'on serre au moyen d'une vis (*fig.* 257). Au passage de la décharge, la feuille d'or se fond, coule à travers les découpures, s'incruste sur le verre et imprime le portrait.

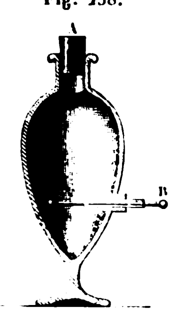
Fig. 257.



Fusinieri, ayant fait passer la décharge entre une boule d'or et une boule d'argent, reconnut que l'argent s'était doré et l'or argenté aux points frappés par l'étincelle; il y a donc un double transport des métaux de l'un vers l'autre dans les deux sens à la fois.

IV. L'étincelle des batteries, et même celle que l'on tire des machines met le feu à tous les corps aisément combustibles. Par exemple, on enflamme de l'éther dans une capsule métallique quand on y fait tomber une étincelle; on enflamme de la résine en déchargeant une batterie à travers un tampon de coton qui en est imprégné, et l'on enflamme également de la poudre en dirigeant une étincelle entre deux épingles piquées en face l'une de l'autre dans une cartouche. L'expérience la plus connue en ce genre est celle du pistolet de Volta. Cet appareil est un vase métallique qu'on remplit d'un mélange détonant dans lequel pénètre une tige isolée B (*fig.* 258). En présentant B à la machine électrique, une étincelle part entre C et la paroi du vase, le mélange s'enflamme et le bouchon est projeté. Une suite d'étincelles successives, continuées pendant longtemps, peut décomposer la plupart des substances chimiques. On sépare par ce moyen les éléments du gaz ammoniac; on décompose partiellement l'acide carbonique en oxyde de carbone et en oxygène; on réduit l'eau en oxygène et en hydrogène; enfin on décompose les acides, les oxydes et les sels. Mais, comme ces actions ont la plus complète analogie avec celles des piles, c'est après avoir décrit ces piles que nous étudierons tous les effets chimiques de l'électricité.

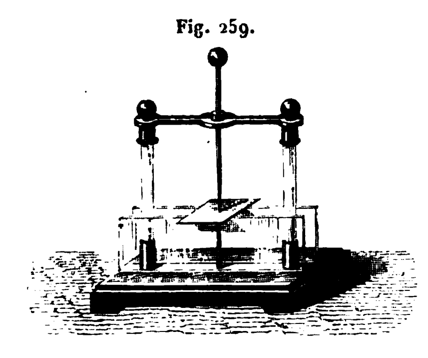
Fig. 258.



V. Quand la décharge est dirigée dans une substance isolante, elle ne la pénètre jamais sans la briser. Pour le montrer on interpose une lame de verre bien sèche (*fig.* 259) entre deux pointes que l'on couvre de résine

fondue, afin d'empêcher la décharge latérale; ensuite on fait communiquer ces deux conducteurs avec les armatures d'une batterie, et il se fait un trou dans le verre.

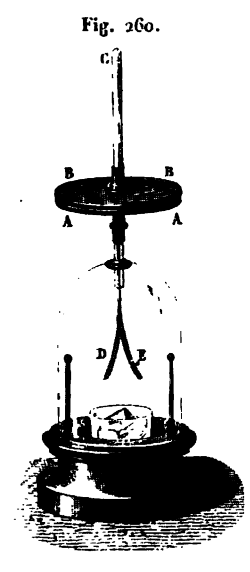
Fig. 259.



On perce de la même manière une carte placée entre deux pointes éloignées, et le trou qui est produit a ses bords relevés sur les deux faces, comme si la matière de la carte avait été soulevée et repoussée dans les deux sens à la fois. Le trou est toujours plus rapproché de la pointe négative que de la positive: il est au milieu de leur intervalle dans l'air raréfié.

Électromètre condensateur. — Le condensateur a été appliqué par Volta pour rendre sensibles des sources électriques très-faibles. Son appareil (*fig.* 260) est l'électroscope ordinaire à lames d'or, auquel il a superposé un condensateur composé de deux plateaux A et B vernis; de cette façon, la lame isolante est double, et chaque plateau en porte une, mais chacune d'elles est extrêmement mince. Si l'on ne fait usage que du plateau inférieur A et qu'on le mette en contact avec une source faible, il s'établit en équilibre avec elle, les lames D, E divergent extrêmement peu et quelquefois elles ne divergent pas sensiblement. Au lieu de cela, superposons le plateau supérieur B, touchons le conducteur inférieur A avec la source et le supérieur avec le doigt : l'appareil se chargera jusqu'à ce que le fluide répandu sur la face inférieure de A et sur les lames d'or soit encore en équilibre avec la source, et la divergence sera la même que précédemment. Mais, en soulevant le plateau B, toute l'électricité qui avait été condensée en A se répandra librement dans la partie ADE, les lames éprouveront une surcharge considérable et leur divergence sera considérablement accrue.

Fig. 260.



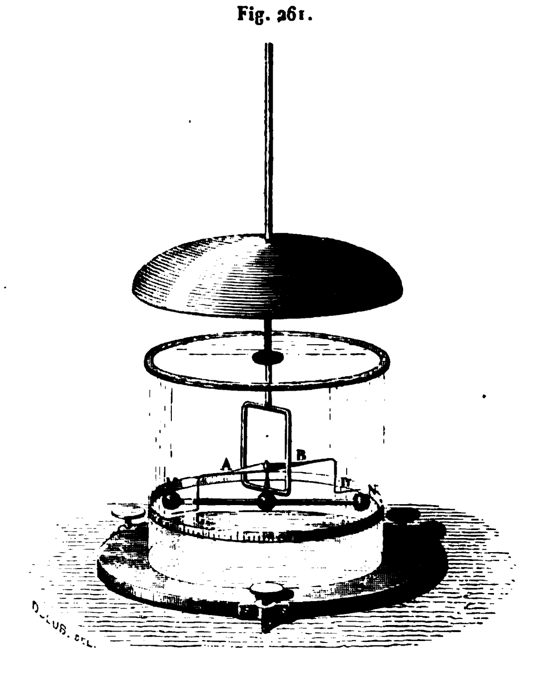
CHAPITRE V.

MÉTÉORES ÉLECTRIQUES.

I. — ÉLECTRICITÉ DE L'ATMOSPHÈRE.

Phénomènes observés par un ciel serein. — Pour savoir si les parties supérieures de l'atmosphère contiennent toujours de l'électricité, Saussure employait l'électromètre à lames d'or, seulement il remplaçait le bouton par une tige métallique verticale terminée en pointe (*fig.* 261). Quand il voulait sonder à une grande hauteur, il entourait cette tige d'une

Fig. 261.



bague reliée à une chaîne métallique au bout de laquelle était une sphère

pleine qu'on lançait en l'air. La chaîne s'élevait avec la sphère, et il y avait un moment où elle n'était plus en communication avec le sol, bien que l'anneau fût encore en contact avec la tige ; c'est pendant ce moment que la charge se faisait. Ensuite l'anneau s'élevait et se séparait de l'électromètre, mais il y laissait l'électricité qu'il y avait apportée et on pouvait la mesurer. Au lieu d'une sphère, MM. Becquerel et Breschet lançaient une flèche avec un arc ordinaire.

Depuis cette époque, on a installé sur les observatoires des tiges métalliques élevées et isolées, reliées à des électroscopes fixés à demeure ; la *fig.* 261 représente celui de Peltier. Les lames d'or sont remplacées par une aiguille horizontale CABD qui est aimantée et se place dans le méridien magnétique ainsi qu'un fil métallique MN terminé par deux boules. Quand on électrise l'instrument, l'aiguille CABD est repoussée par les boules, on mesure l'angle d'écart et on en conclut la charge de l'appareil. C'est avec ces appareils que l'on a pu obtenir des indications continues ; elles ont prouvé qu'il y a toujours de l'électricité dans l'air, qu'elle est variable aux diverses heures de la journée et aux diverses saisons ; plus marquée quand on s'élève, plus faible dans les lieux abrités, et nulle sous les toits ; qu'enfin elle est *positive* à de très-rares exceptions près.

Immédiatement après le lever ou après le coucher du soleil, l'effet croît jusqu'à un maximum, puis diminue peu à peu jusqu'à atteindre un minimum qui précède le moment du coucher ou du lever suivant. Voici les heures des maxima et des minima :

1er minimum.	1er maximum.	2e minimum.	2e maximum.
2 h. du matin.	10 h. du matin.	2 h. après midi.	10 h. du soir.

A 11 heures du matin, la déviation de l'instrument est sensiblement la moyenne. En la mesurant tous les jours à cette heure et faisant la somme, on a trouvé que les signes électroscopiques sont beaucoup moindres en été qu'en hiver, comme on le verra par le tableau suivant qui résume les observations faites à Bruxelles pendant l'année 1846.

Janvier	562°	Juillet	33°
Février	256	Août	57
Mars	95	Septembre	62
Avril	94	Octobre	92
Mai	49	Novembre	274
Juin	39	Décembre	799

Pour expliquer ces résultats, il faut d'abord analyser le jeu de l'électroscope. Les hautes parties de l'atmosphère sont chargées positivement ;

leur influence amène à l'extrémité de l'électroscope le fluide négatif et refoule le positif dans les lames d'or. Si les couches moyennes sont humides, elles permettent à l'électricité positive de se rapprocher du sol. l'influence augmente et les déviations s'exagèrent; c'est ce qui arrive pendant l'hiver. Quand ces couches sont sèches, elles isolent les couches supérieures, et l'effet diminue : cela a lieu pendant l'été. On peut donc dire que l'électroscope mesure la conductibilité de l'atmosphère. Au moment du lever du soleil, les vapeurs s'élèvent dans l'air et le rendent conducteur : de là un maximum. L'air se dessèche ensuite jusqu'à 2 heures : l'effet devient minimum. Il augmente ensuite et repasse par un maximum quand l'air se refroidit et que les vapeurs se condensent après le coucher du soleil. Pendant la nuit, l'action diminue, parce que tout ce qui pouvait être transmis a été transporté.

Électricité des nuages. — On vient de voir que pendant l'été l'électricité demeure dans les couches supérieures, c'est à ce moment que les orages se forment. On ne connaît pas ce qui détermine la formation d'un nuage; mais quand elle a lieu, l'air cède son électricité aux globules condensés, le nuage contient la totalité du fluide primitivement renfermé dans le volume d'air qu'il occupe, et ce fluide s'accumule à sa surface. Il résulte de là que tout nuage devrait être chargé positivement : mais on va voir que cette électricité pourra quelquefois changer de signe. Imaginons qu'un nuage soit formé et chassé par le vent. Il est, comme la terre, comme nos électroscopes, comme les sommets des montagnes. exposé à l'action d'influence des couches supérieures de l'atmosphère, qui sont plus positives que lui, qui attirent à son sommet l'électricité négative et repoussent l'électricité positive vers sa partie inférieure. Celle-ci peut se perdre, et il ne reste plus que de l'électricité négative au sommet. Si l'influence qui l'y a amenée diminue, on voit cette électricité se disséminer sur toute la surface et se manifester par les électroscopes au-dessus desquels elle passe.

Il y a une autre classe de nuages négatifs. La terre étant négative, tout nuage qui se forme au contact du sol partage son électricité. C'est ce que Saussure a directement constaté.

Origine de l'électricité atmosphérique. — La cause la plus générale de l'électricité atmosphérique est l'évaporation. M. Pouillet fit bouillir de l'eau dans un creuset de platine rougi qu'il avait placé sur le plateau collecteur de l'électromètre condensateur, pendant que le plateau condenseur était en communication avec le sol. En séparant les deux conducteurs. il reconnut que le creuset était négatif et la vapeur positive quand l'eau

était chargée d'un sel ou d'un acide; que le contraire avait lieu si elle était alcaline, et que l'effet était nul avec l'eau pure.

On peut dès lors admettre que, pendant l'évaporation de la mer, les vapeurs en se formant emportent de l'électricité positive, qu'elles en chargent l'atmosphère, que les vents la transportent sur les continents, principalement de l'équateur aux pôles, dans les régions élevées, avec le courant équatorial, que les électroscopes en accusent l'existence, et qu'elle développe ensuite les effets de la foudre.

II. — ORAGES.

L'idée d'assimiler la foudre à l'électricité est aussi ancienne que la découverte de l'étincelle. C'est Franklin qui, en juin 1752, conduisit jusqu'au sol, au moyen d'un cerf-volant, l'électricité des nuages orageux. Dirigé par les idées de Franklin, Dalibard avait déjà, au mois de mai de la même année, obtenu des étincelles d'une tige métallique dressée en plein air. En 1753, de Romas répéta l'expérience du cerf-volant. Les résultats furent extraordinaires. On tira de la corde, mêlée de fils métalliques, des étincelles de 9 pieds de long, de 1 pouce de large, et qui partaient comme des coups de pistolet.

Éclair. — Ces expériences prouvent que l'éclair est une étincelle électrique et le tonnerre son bruit. Il reste à expliquer toutes les circonstances du phénomène; là se rencontrent quelques difficultés. On peut mesurer la distance du nuage à l'observateur par le temps qui s'écoule entre l'éclair et le tonnerre; d'autre part, en appréciant approximativement l'angle soustendu par les deux extrémités de l'éclair, on peut calculer à peu près son étendue. On trouve ainsi que souvent l'éclair atteint de 5 à 6 lieues, et il est difficile d'admettre une puissance électrique assez considérable pour donner lieu à une étincelle unique de pareille grandeur. Mais un nuage n'est point un conducteur métallique, c'est une masse discontinue où l'électricité peut être très-inégalement distribuée et où peut se produire une série d'étincelles se continuant de l'une à l'autre, comme dans les tubes étincelants. Dès lors cet immense longueur ne nous étonne plus, puisque l'éclair est une suite d'étincelles et non plus une étincelle unique.

Tonnerre. — Du moment qu'un éclair est formé d'étincelles électriques, le tonnerre en est le bruit. Mais le bruit d'une étincelle est sec et ne se prolonge pas, celui du tonnerre se compose d'éclats successifs ordinaire-

ment suivis par un grondement sourd. On peut expliquer cette différence. Le bruit d'un éclair prend naissance au même moment en chacune de ses parties, à des distances très-diverses de l'observateur, et il ne peut lui parvenir que successivement, après avoir mis des temps inégaux pour arriver des différents points à l'oreille. Si l'éclair était rectiligne, le bruit du tonnerre, maximum au commencement, décroîtrait continûment ; mais comme l'éclair est en zigzag, chaque portion rectiligne qui le compose envoie un son plus ou moins intense suivant sa direction, et le tonnerre se compose de bruits successifs inégalement forts : de là des éclats, des renforcements et des affaiblissements.

Influence des nuages orageux sur le sol. — Quand l'atmosphère est fortement électrisée, elle attire à la surface du sol une électricité contraire à la sienne ; on voit se produire les phénomènes de la répulsion électrique, et des aigrettes lumineuses se montrent sur les pointes métalliques. Les observations anciennes et modernes mettent ce fait hors de doute. Le feu *Saint-Elme* n'est autre chose qu'une illumination de ce genre.

Choc en retour. — La décomposition électrique ne s'exercera pas également en tous les points : elle sera très-faible sur les corps mauvais conducteurs ou sur les animaux isolés du sol, très-énergique sur les terrains bons conducteurs, sur le sol humide et sur les masses métalliques ; elle agira principalement sur les lieux élevés, les clochers, les arbres ou les mâts.

Si le nuage électrique qui développe cette action est brusquement déchargé, son action d'influence est subitement détruite, le sol retourne brusquement à l'état naturel avec les animaux qui s'y trouvent, et ces derniers éprouvent des commotions électriques. On a vu des troupeaux entiers, des attelages de chevaux, des groupes nombreux de personnes réunies, éprouver en même temps ce genre d'actions et quelquefois y succomber. Ce phénomène se nomme le *choc en retour*.

Pendant tout le temps que dure cette influence électrique, un phénomène plus terrible encore est imminent : c'est la recomposition directe du fluide neutre entre la terre et le nuage ; c'est alors que le *tonnerre tombe* sous la forme d'un trait de feu qui n'est qu'une étincelle de grande dimension. Il est évident qu'il tombera de préférence sur les sommets des montagnes, des édifices ou des arbres, et en général sur les corps les plus conducteurs. Les terrains secs, les lieux abrités, les corps isolés ne seront foudroyés que très-rarement, puisqu'ils n'étaient pas préalablement chargés d'électricité contraire à celle du nuage.

Effets de la foudre. — Puisque la foudre est une décharge électrique, elle doit produire avec une énergie plus grande tous les effets des batteries :

1° Le plus grave est la mort des hommes et des animaux qu'elle frappe. On trouve sur leurs cadavres des plaies béantes, et à l'intérieur des épanchements de sang. Quelquefois l'action se borne à un simple évanouissement, au sortir duquel les personnes frappées racontent toutes qu'elles n'ont même pas vu l'éclair. On a cité des cas où des paralytiques avaient été guéris par le tonnerre.

2° Les corps conducteurs attirent le tonnerre parce qu'il se fait à leur surface une accumulation de fluide contraire à celui du nuage. Aussi voit-on souvent la foudre se déranger de sa route pour se jeter, à travers un mur qu'elle crève, sur un conduit métallique. Si leur dimension est considérable, les pièces métalliques sont parcourues par le tonnerre sans aucun effet apparent. Quand leur section n'est pas assez grande, elles sont fondues et même volatilisées. Les cordons de sonnette servent souvent de conducteur à la foudre ; ils sont généralement fondus et laissent une trace brune le long des murs.

3° Les corps isolants éprouvent deux sortes d'effets. Ils sont brisés, percés, transportés et réduits en poudre, ou bien ils sont fondus.

Près de Manchester, à Swinton, un petit bâtiment de briques servant à emmagasiner du charbon de terre et terminé à sa partie supérieure par une citerne, était adossé contre une maison. Les murs avaient 3 pieds d'épaisseur et 11 de hauteur. Le 6 août 1809, une explosion épouvantable se fit entendre. Le mur extérieur du petit bâtiment fut *arraché* de ses fondations et *soulevé* en masse ; l'explosion le porta verticalement, *sans le renverser*, à quelque distance de la place qu'il occupait d'abord ; l'une de ses extrémités avait marché de 9 pieds, l'autre de 4. Le mur ainsi soulevé se composait de 7 000 briques et pouvait peser environ 26 tonnes.

La foudre tomba, en 1761, sur le clocher de Saint-Brindes à Londres. C'est une flèche de pierres reliées par des crampons ; les dernières assises sont massives et traversées par une tige de fer de 6 mètres qui se termine par une croix. C'est sur cette tige que la foudre arriva d'abord. Elle la suivit jusqu'à sa base sans laisser aucune trace ni sur le métal, ni sur aucun point de la maçonnerie environnante ; mais dès qu'un métal continu lui manqua, les dégâts commencèrent. La grosse pierre qui soutenait l'extrémité inférieure de la barre offrait des éclats et des fentes dirigées dans tous les sens ; une très-large ouverture s'était formée du dedans en dehors de la flèche, et la descente se continua par bonds, de crampon en crampon. A tous les scellements, les pierres furent fendues, pulvérisées,

lancées au loin ; partout ailleurs qu'à ces points du suture, les dégâts étaient nuls ou sans gravité, comme si la foudre ne parvenait à s'échapper par les bouts des pièces métalliques qu'elle a envahies qu'à l'aide d'un violent effort qui détruit tout aux environs.

Saussure dans les Alpes, Ramond au Pic-du-Midi, de Humboldt en Amérique, ont trouvé sur les rochers élevés des places vitrifiées où se voyaient des globules fondus ; ils ont tous unanimement attribué ces apparences à l'action du tonnerre. C'est encore à la même origine que l'on rapporte la formation des fulgurites, sorte de tubes vitrifiés enfoncés verticalement dans le sol et qu'on a trouvés dans presque toutes les localités où le sol est couvert d'une couche de sable au-dessous de laquelle il y a de l'eau. On suppose que le tonnerre tombant sur ces sables y fait un trou, dont il échauffe les parois jusqu'à les vitrifier.

Le 17 juillet 1823, le tonnerre tomba sur un bouleau près du village de Rauschen (sur la côte de la mer Baltique). Les habitants étant accourus virent, auprès de l'arbre, deux trous étroits et profonds ; l'un d'eux, malgré la pluie, leur parut, au tact, à une température élevée, et le professeur Hagen, de Konigsberg, ayant fait creuser avec soin autour de ces trous, découvrit un tube vitrifié dont l'intérieur était très-luisant, couleur gris de perle et parsemé de points noirs.

Foudre globulaire. — La foudre affecte quelquefois un état tout à fait inexplicable. Elle se présente sous la forme d'une boule qui s'avance très-lentement et finit par éclater. Je ne citerai qu'un fait raconté par M. Babinet. « .... Après un assez fort coup de tonnerre, mais non immédiatement après, un ouvrier, dont la profession est celle de tailleur, étant assis à côté de sa table et finissant de prendre son repas, vit tout à coup le châssis garni de papier qui fermait la cheminée s'abattre, comme renversé d'un coup de vent assez modéré, et un globe de feu gros comme la tête d'un enfant sortir doucement de la cheminée et se promener lentement par la chambre à peu de hauteur des briques du pavé. L'aspect du globe de feu était encore, suivant l'expression de l'ouvrier tailleur, celui d'un jeune chat de grosseur moyenne pelotonné sur lui-même et se mouvant sans être porté sur ses pattes. Le globe de feu était plutôt brillant et lumineux qu'il ne semblait chaud et enflammé, et l'ouvrier n'eut aucune sensation de chaleur. Ce globe s'approcha de ses pieds, comme un jeune chat qui vient jouer et se frotter aux jambes suivant l'habitude de ces animaux ; mais l'ouvrier écarta les pieds, et par plusieurs mouvements de précaution, exécutés, suivant lui, très-doucement, il évita le contact du météore. Celui-ci paraît être resté plusieurs secondes autour des pieds de l'ouvrier assis qui l'exa-

minait attentivement penché en avant et au-dessus. Après avoir essayé quelques excursions dans divers sens sans cependant quitter le milieu de la chambre, le globe de feu s'éleva verticalement à la hauteur de la tête de l'ouvrier, qui, pour éviter d'être touché au visage et en même temps pour suivre des yeux le météore, se redressa en se renversant sur sa chaise. Arrivé à la hauteur d'environ 1 mètre au-dessus du pavé, le globe de feu s'allongea un peu et se dirigea obliquement vers un trou percé dans la cheminée environ à 1 mètre au-dessus de la tablette de cette cheminée.

» Ce trou avait servi à faire passer le tuyau d'un poêle qui, pendant l'hiver, avait servi à l'ouvrier. Mais, suivant l'expression de ce dernier, le tonnerre ne pouvait le voir, car il était fermé par du papier qui avait été collé dessus. Le globe de feu alla droit à ce trou, décolla le papier sans l'endommager et remonta dans la cheminée ; alors, suivant le dire du témoin, après avoir pris le temps de remonter dans la cheminée *du train dont il allait,* c'est-à-dire lentement, le tonnerre, arrivé au haut de la cheminée, qui était au moins à 20 mètres du sol de la cour, produisit une explosion épouvantable qui détruisit une partie du faîte de la cheminée et en projeta les débris dans la cour.... »

Paratonnerre. — Pour détruire les effets de la foudre, il faut fournir aux nuages une électricité contraire, et Franklin y a réussi en armant les édifices de tiges métalliques en communication avec le sol, tiges qui prennent à leur sommet une électricité contraire à celle de l'air et qui, étant terminées en pointe, la laissent échapper sous forme d'aigrette vers le nuage superposé, qu'elles ramènent à l'état naturel. On voit que l'effet permanent d'un paratonnerre est de diminuer l'intensité des manifestations électriques des nuages ; c'est aussi ce que toutes les statistiques viennent prouver, et si une étincelle se forme entre l'édifice et la nuée, c'est sur le paratonnerre qui est le plus chargé d'électricité contraire qu'elle viendra aboutir. L'efficacité d'un pararonnerre est démontrée dans chaque lieu par la comparaison que l'on fait entre les nombres de coups de tonnerre qui ont frappé l'édifice avant et après l'établissement de la tige métallique, comparaison qui est dans tous les cas en faveur de la dernière période. On admet généralement que l'effet préservateur du paratonnerre s'étend jusqu'à un rayon double de sa hauteur.

Les détails de la construction de ces appareils ont été réglés par des instructions rédigées à plusieurs reprises par les Corps savants. La tige terminale doit être amincie en pointe, et, pour éviter l'oxydation, on la recouvre de platine. A la base de la tige on fixe une barre de fer de 20 millimètres de côté, que l'on fait régner d'une manière continue sur le faîte

du toit et communiquer avec toutes les pièces métalliques de l'édifice. Enfin elle plonge en se ramifiant dans des puits profonds, où elle est entourée d'eau et de corps conducteurs, tels que la braise de boulanger, qui a le double avantage d'empêcher l'oxydation et de conduire l'électricité. C'est à ces conditions qu'un paratonnerre est utile. S'il était isolé du sol, il deviendrait un danger.

LIVRE IV.

ÉLECTRO-DYNAMIQUE.

CHAPITRE PREMIER.

ORIGINE ET THÉORIE CHIMIQUE DES COURANTS.

I. — FORCE ÉLECTROMOTRICE. — SON EFFET ; SA MESURE.

Nous avons vu qu'en frottant du verre contre de la laine, on décompose une certaine quantité de fluide neutre, que le verre prend une tension positive et la laine une tension négative. On nomme *force électromotrice* la cause qui produit cette séparation. On peut mesurer cette force en évaluant par un électromètre la tension limite qu'elle communique aux deux corps entre lesquels elle agit.

Supposons qu'on réunisse par un fil métallique les deux conducteurs d'une machine de Holtz ou la chaudière et le peigne d'un appareil d'Armstrong ; les deux électricités se recombineront, la force électromotrice les reproduira aussitôt, et il en résultera dans le fil un mouvement électrique qu'on nomme *courant*.

Pour expliquer ce mouvement électrique, M. de la Rive a fait l'hypothèse suivante. Décomposons le conducteur interpolaire en filets linéaires de molécules A, B, C, D (*fig.* 262) soumises à l'influence électrique des

Fig. 262.

M A B C H I L N
+ − + − + − + − + − + − + —

deux pôles + M et — N. Au premier moment, elles se chargent de fluide + aux extrémités qui regardent — N et d'électricité — à celles qui sont tournées vers + M. Cette séparation par influence augmente rapidement

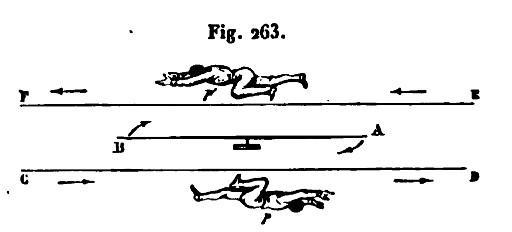
jusqu'au moment où les fluides opposés ont acquis une tension suffisante pour vaincre la résistance des espaces intermoléculaires; alors ils se recombinent : tout le conducteur est ramené à l'état naturel. Une portion constante de fluide — a avancé d'un rang, de molécule en molécule, vers + M; une quantité égale de fluide + a reculé inversement d'un rang vers — N; les deux pôles sont déchargés. Aussitôt après, la source agit pour reproduire leur tension primitive, et les mêmes effets se reproduisent indéfiniment.

Que cette hypothèse soit fondée ou non, on est convenu de dire que le courant va de la source positive à la source négative; et pour exprimer tous les phénomènes qu'il produit, on a imaginé de le représenter par une poupée qu'il parcourrait des pieds à la tête et qui le personnifie. La face, le dos, la droite et la gauche de cette poupée sont ce que nous appellerons : la *face*, le *dos*, la *droite* et la *gauche du courant*.

L'intensité et le sens du courant pourront, toutes choses égales d'ailleurs, mesurer la force électromotrice qui produit ce mouvement. Avant tout, cherchons un moyen de reconnaître l'existence, de fixer le sens et de mesurer l'intensité du courant.

Expérience d'Œrsted. — Ce moyen découle d'une expérience célèbre exécutée, en 1819, par Œrsted. Il reconnut que toute aiguille aimantée placée dans le voisinage d'un courant électrique éprouve une déviation. L'expérience se fait en plaçant le fil traversé par le courant en CD ou en EF (*fig.* 263), au-dessus ou au-dessous d'une aiguille aimantée AB, dans le

Fig. 263.

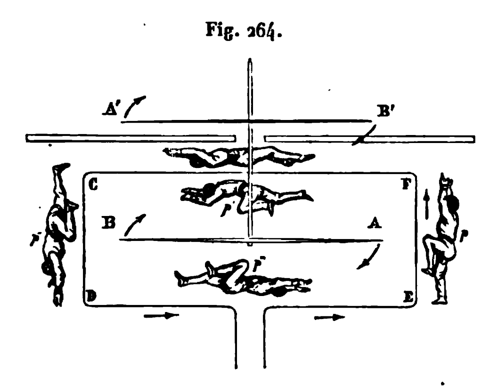


plan vertical qui passe par cette aiguille et qu'on nomme le *méridien magnétique*. Aussitôt elle se dévie, et si l'on figure en p et en p' la poupée qui personnifie le courant, et que sa face regarde l'aiguille, c'est vers sa gauche qu'est dévié le pôle austral, c'est-à-dire celui qui se dirige vers le pôle nord de la terre. La déviation est égale à 90 degrés si le courant est intense et très-rapproché; elle diminue s'il décroît ou s'éloigne. On conçoit dès lors que l'existence, le sens et l'intensité d'un courant seront connus si l'on me-

sure la déviation d'une aiguille convenablement disposée dans son voisinage. On emploie, pour faire cette mesure, l'appareil nommé *galvanomètre*.

Galvanomètre. — On replie le fil conducteur autour de l'aiguille AB sur un cadre DEFC (*fig.* 264). Chacun des côtés du rectangle agit de manière

Fig. 264.



à dévier le pôle austral vers la gauche du courant. Or, que l'on suppose d'abord la poupée en p sur EF, et qu'on la fasse ensuite glisser sur le fil pour l'amener en p', p'', p''', avec la condition qu'elle regarde toujours l'aiguille, sa droite reste dirigée en arrière et sa gauche en avant du tableau, et, par suite, toutes les parties du rectangle concourent à imprimer à l'aiguille une déviation de même sens, indiquée par les flèches A et B. On ramène ensuite le fil de manière à former un second tour sur le rectangle, ce qui double l'action; et, si l'on fait mille tours égaux, l'effet devient mille fois plus grand : de là le nom de *multiplicateur* que l'on donne à cet instrument.

On peut encore augmenter la sensibilité de l'appareil en employant un système de deux aiguilles opposées AB, A'B' fixées à une tige verticale qui les rend solidaires. La terre agit inversement sur chacune d'elles et produit sur leur système une action qui est sensiblement nulle. D'un autre côté, l'effet total du courant se composera de celui qui s'exerce sur l'aiguille AB, lequel est, comme precédemment, représenté par les flèches A et B, et aussi de l'action exercée sur A'B'. Or cette action se réduira sensiblement à l'effet de la partie FC, qui est prédominante, parce qu'elle est la plus rapprochée. Si donc on retourne la poupée p' pour qu'elle regarde A'B', elle aura sa gauche derrière le tableau, et le courant y chassera le pôle A' dans le même sens que la flèche A. Conséquemment, l'addition d'une seconde aiguille a le double avantage de diminuer l'action terrestre et d'augmenter l'action du courant; et si l'on se rappelle que celle-ci est propor-

tionnelle au nombre des tours, on voit que la sensibilité de l'appareil ne sera limitée que par des difficultés de construction.

Les *fig.* 265 et 266 représentent une coupe et l'aspect général d'un galvanomètre. L'appareil repose sur un pied à vis calantes et tourne autour

Fig. 265.

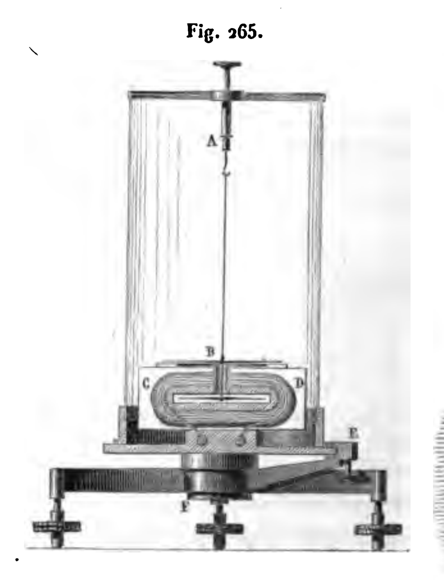
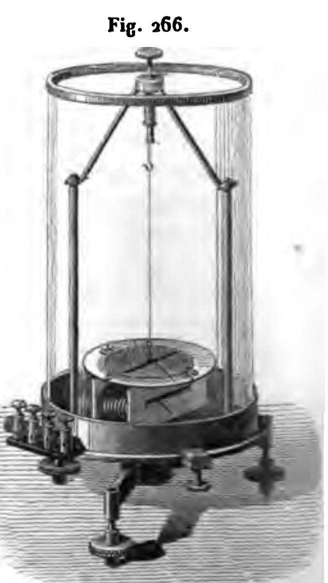


Fig. 266.

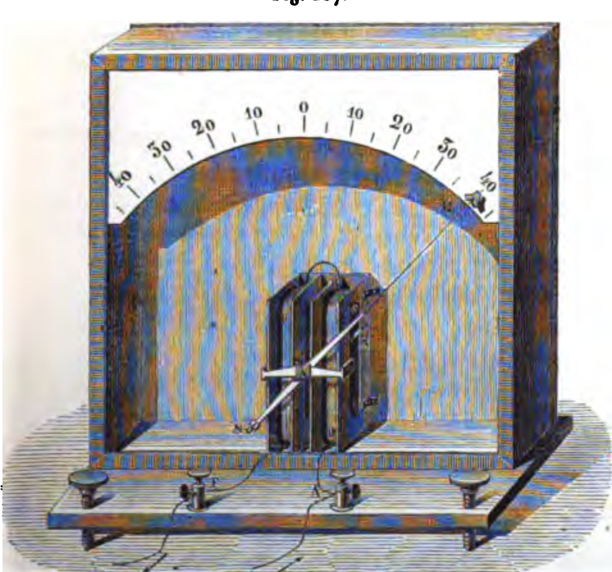


d'un axe vertical F qui permet de l'orienter; une vis de pression E le fixe invariablement quand il est réglé. Le cadre CD est de cuivre; il est percé d'un trou vertical A, destiné à laisser passer la tige qui réunit les deux aiguilles; il est entouré de fils de cuivre recouverts de soie qui en font le tour un nombre plus ou moins considérable de fois et qui aboutissent à des poupées extérieures AA, BB qu'on voit *fig.* 266; enfin il est recouvert d'un cercle horizontal divisé, dont la ligne 0-180 est parallèle aux plans des fils. Les deux aiguilles sont soutenues à une potence par un fil de cocon AB accroché à un bouton A, que l'on peut soulever ou abaisser, suivant que l'on veut les suspendre librement ou les laisser reposer sur le cadre pour arrêter leurs oscillations. L'aiguille supérieure parcourt les divisions du cercle et mesure les déviations. Le tout est recouvert d'une cloche de verre.

La *fig.* 267 montre un grand galvanomètre vertical construit sur les mêmes principes et qui peut servir dans les cours.

Au moyen de l'électroscope condensateur et de ce galvanomètre, nous allons démontrer qu'une force électromotrice se développe dans des cir-

Fig. 267.

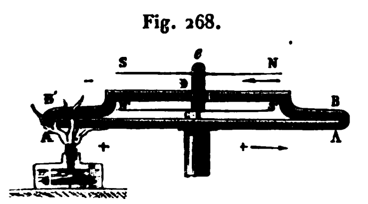


constances très-diverses, et notamment par deux causes que nous étudierons spécialement : la chaleur et l'action chimique.

II. — COUPLE ET PILE THERMO-ÉLECTRIQUES.

Couple thermo-électrique. — Les phénomènes que nous allons décrire ont été découverts par Seebeck. Prenons deux lames de bismuth et d'antimoine BB', AA' (*fig.* 268) soudées à leurs extrémités, de manière à former un circuit complet. Un système de deux aiguilles astatiques NS, N'S', posé sur un pivot C*e*, occupe dans ce circuit la même position que dans un galvanomètre. Il n'est point dévié si les températures sont égales aux

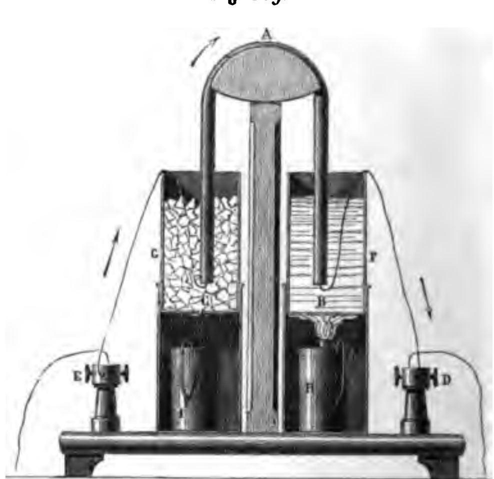
Fig. 268.



deux extrémités AB, A′B′. Mais lorsqu'on vient à chauffer A′B′, les aiguilles se déplacent et accusent un courant qui va de A′ en A et de B en B′, et qui indique que l'antimoine devient positif et le bismuth négatif. Il change de sens si c'est la soudure AB qui est échauffée.

On peut faire l'expérience d'une manière plus générale (*fig.* 269), en soudant aux deux extrémités d'un cylindre de métal recourbé deux fils de

Fig. 269.



cuivre BD et CE, les mettant en communication avec un galvanomètre, chauffant l'une des soudures B et refroidissant l'autre C. Cet appareil se nomme *couple thermo-électrique*.

Tous les métaux en contact produisent les mêmes actions avec des différences d'intensité. Pour les classer par ordre de pouvoir électromoteur, M. Becquerel forme, avec divers métaux soudés, une chaîne dont il fixe les bouts aux extrémités du galvanomètre et qu'il maintient à zéro, à l'exception de l'une des soudures, qu'il chauffe à 20 degrés. Il en résulte un courant, dont on mesure l'intensité et le sens. Comme la conductibilité totale ne change pas quand on répète l'expérience sur les diverses soudures, la force électromotrice est, dans chaque cas, proportionnelle à cette intensité. C'est ainsi que M. Becquerel a dressé le tableau suivant, où chaque métal est négatif quand il est combiné avec tous ceux qui le suivent, et positif avec ceux qui le précèdent, la force électromotrice étant d'autant plus grande que les corps considérés sont plus distants dans la liste :

Bismuth,	Argent,	Or,
Nickel,	Étain,	Zinc,
Platine,	Plomb,	Fer,
Palladium,	Rhodium,	Arsenic,
Cobalt,	Laiton,	Antimoine.
Manganèse,	Cuivre,	

Quand l'excès de température d'une soudure sur toutes les autres reste très-petit, l'intensité du courant est généralement proportionnelle à cet excès; mais quand il devient de plus en plus grand, cette loi ne se soutient pas : il y a même des cas où le courant, après avoir augmenté, diminue, devient nul et change de signe à une température déterminée, variable avec les corps considérés; elle est :

Entre	l'argent	et	le cuivre	égale	à	125°,
»	l'or	»	zinc	»	à	150°,
»	fer	»	cuivre	»	au	rouge sombre.

Pile thermo-électrique. — Réunissons maintenant plusieurs couples semblables (*fig.* 270). Refroidissons toutes les soudures impaires V′, V′,...,

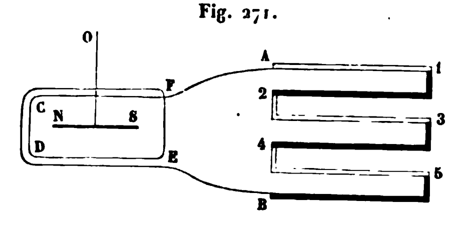
Fig. 270.



et réchauffons toutes les soudures paires V, V,.... Chaque couple donnera un courant dans le même sens allant, dans chaque cuivre, de la partie chaude à la soudure froide, et tous ces courants s'ajouteront si l'on réunit les deux extrémités de l'appareil par un circuit extérieur. C'est ainsi que Nobili a construit une pile thermo-électrique.

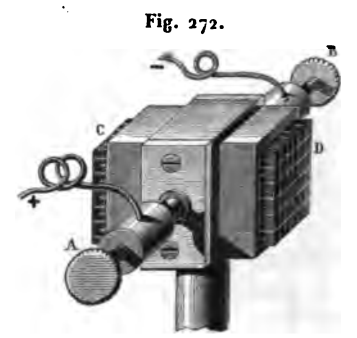
Tout récemment, M. Bunsen a découvert que la pyrite de cuivre, à l'état naturel, est encore plus fortement négative que le bismuth, et M. E. Becquerel a démontré que le protosulfure de cuivre est plus positif que l'antimoine. L'emploi de ces deux substances permet de construire des piles thermo-électriques très-puissantes. D'un autre côté, M. Marcus, de Vienne, a obtenu des effets très-remarquables en composant une pile thermo-électrique avec deux alliages soudés : le positif, composé de cuivre et de zinc, le négatif, d'antimoine et de zinc.

Fig. 271.



Comme les soudures de rang pair ou impair doivent être toutes refroidies ou échauffées, Nobili a imaginé de disposer les soudures paires d'un côté de la pile et les soudures de rang impair de l'autre (*fig.* 271). De cette façon, on met la pile en activité rien qu'en chauffant l'une de ses faces, et le courant change de sens si l'on change le côté qu'on échauffe. En diminuant l'étendue des éléments et en multipliant leur nombre (*fig.* 272), il a réussi à donner à ces piles une sensibilité assez grande pour les employer à l'étude du rayonnement calorifique, comme nous le montrerons dans la suite.

Fig. 272.



III. — TOUTE ACTION CHIMIQUE DÉVELOPPE UNE FORCE ÉLECTROMOTRICE.

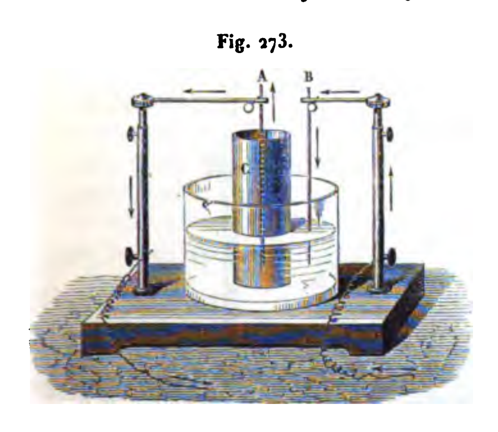
Nous allons démontrer qu'il se développe une force électromotrice toutes les fois qu'une action chimique se produit entre deux corps en contact.

I. *Entre deux corps simples.* — M. Pouillet place sur le plateau supérieur d'un électromètre condensateur un cône de charbon allumé à son sommet, et, pendant que le plateau inférieur est en communication avec le sol, on entretient la combustion par un jet d'oxygène ou d'air. Au bout de peu d'instants, l'appareil est chargé, et le plateau supérieur a reçu de l'électri-

cité négative. On peut aussi disposer le charbon sur un support métallique au-dessous de l'électromètre et projeter l'oxygène de manière qu'il rencontre d'abord le charbon, ensuite le plateau inférieur : on trouve que les lames d'or prennent l'électricité positive.

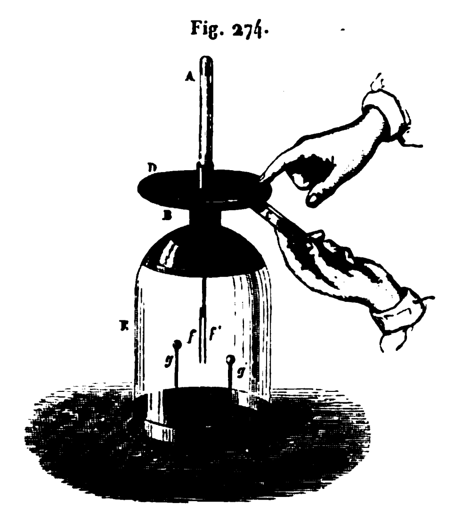
II. *Entre un acide et un oxyde.* — Plaçons dans un bocal de verre un vase de terre cuite poreuse (*fig.* 273). Versons un acide dans ce vase et une solution de potasse à l'extérieur, puis mettons les deux liquides en communication avec un galvanomètre par deux tiges de platine A et B et par les supports de l'appareil : ils se combineront peu à peu à travers la paroi poreuse, et un courant énergique ira dans le sens des flèches, de l'acide vers l'alcali, ce qui veut dire que l'acide est positif et l'alcali négatif.

Fig. 273.



III. *Entre les liquides et les métaux.* — 1° Prenons une lame de zinc entre les doigts de la main gauche mouillés par un acide étendu, et mettons cette lame en contact avec le plateau collecteur de l'électromètre pendant que nous ferons communiquer l'autre plateau avec le sol par la main droite (*fig.* 274). Nous trouverons en soulevant ce dernier plateau que les lames f, f' et, par suite, le zinc étaient chargés négativement. Cette charge est nulle si les doigts de la main sont secs ; elle est d'autant plus forte qu'ils sont plus acidulés.

Fig. 274.

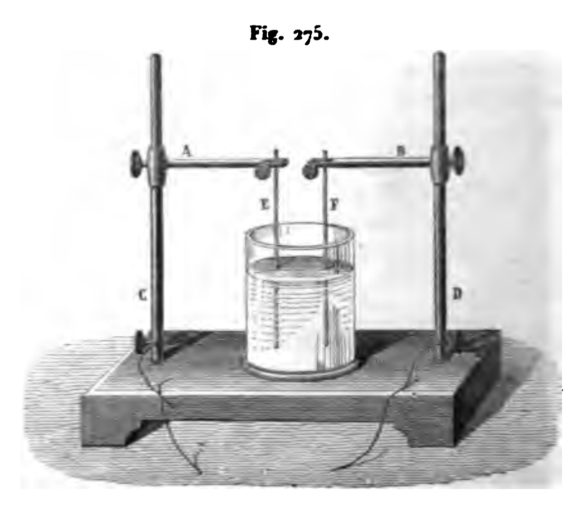


Répétons la même expérience en interposant entre la lame de zinc et le

plateau collecteur un morceau de drap imbibé d'eau acidulée. Nous trouverons que B a pris de l'électricité positive. Ainsi, pendant que l'acide sulfurique étendu agit sur le zinc, il devient positif, et le zinc négatif.

2° Plongeons dans une solution d'acide sulfurique deux tiges E, F (*fig.* 275), l'une de platine et l'autre de zinc, et faisons-les communiquer

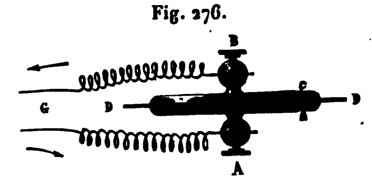
Fig. 275.



avec un galvanomètre par le support de l'appareil. Un courant très-vif partira du platine pour aboutir au zinc en passant par le galvanomètre. On en conclut que le liquide est positif et le zinc négatif.

On fait plus simplement l'expérience en prenant deux disques z, c, l'un de zinc et l'autre de cuivre, les séparant par un drap mouillé d'acide DD et les mettant en communication avec un galvanomètre (*fig.* 276). Si, dans cette expérience, on remplace le zinc par du platine, l'acide sulfurique par de l'acide azotique, le disque de cuivre est attaqué, il devient négatif, et le courant change de sens.

Fig. 276.



3° Au moyen de l'appareil déjà employé (*fig.* 275), on plonge dans l'acide azotique deux fils d'or. Aucun effet ne se produit. Mais quand avec une pipette on ajoute quelques gouttes d'acide chlorhydrique autour de l'un des fils, il est attaqué, et un courant se produit. Ce courant va, à l'extérieur, du liquide au fil qui se dissout; celui-ci est donc négatif et le

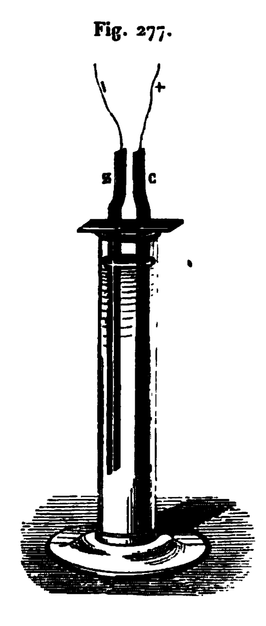
liquide positif. L'action cesse quand l'acide chlorhydrique a été épuisé ; on la reproduit en sens opposé en versant l'acide contre l'autre fil.

On voit en résumé que *toutes les fois que deux corps se combinent, ils s'électrisent : ceux qui jouent le rôle d'acide, positivement ; ceux qui agissent comme base, négativement.* Mais il faut soigneusement distinguer entre deux sortes d'actions chimiques, l'une efficace, l'autre qui est sans influence sur la production du courant.

Zinc amalgamé. — Une lame de zinc pur ou de zinc ordinaire primitivement amalgamé ne se dissout pas sensiblement, seulement elle se revêt de bulles d'hydrogène, qui, grossissant peu à peu, restent adhérentes à sa surface et ne se dégagent qu'avec une extrême difficulté.

Cela étant, plongeons dans l'eau acidulée deux lames, l'une de cuivre C, l'autre de zinc amalgamé Z (*fig.* 277), et mettons-les en communication avec un électromètre condensateur ; nous trouverons que le cuivre est positif et prend une tension $+\varepsilon$, et le zinc négatif avec une tension $-\varepsilon$. Il y a eu décomposition d'une quantité déterminée de fluide neutre, mais il n'y a point de courant ni d'action chimique continue. Si alors nous réunissons C et Z par un galvanomètre, aussitôt l'eau commence à être décomposée avec des circonstances tout exceptionnelles. L'hydrogène se dégage, non contre le zinc, mais en bulles serrées sur la surface du cuivre, et le zinc amalgamé, qui jusqu'alors était inactif, se dissout peu à peu sans changer aucunement d'aspect, sans cesser d'être recouvert des mêmes bulles adhérentes qui signalaient la première phase de l'expérience. Toutes les fois qu'on ouvre le circuit, le dégagement d'hydrogène sur le cuivre et la dissolution du zinc s'arrêtent ; toutes les fois qu'on le ferme et que le courant se rétablit, les deux actions recommencent. On voit par là qu'on ne peut faire circuler l'électricité qu'à la condition de dissoudre du métal, et que cette action chimique spéciale est liée d'une manière évidente à la production du courant : elle est *efficace*.

Fig. 277.



Si maintenant nous remplaçons le zinc amalgamé par du zinc ordinaire,

il présente les mêmes effets de tension quand le circuit est ouvert, les mêmes courants et la même action chimique s'il est fermé; mais il offre en outre une autre action chimique qui est indépendante du courant : c'est un dégagement d'hydrogène en grosses bulles, non sur le cuivre, mais sur le zinc lui-même, qui ne cesse jamais et dépense du zinc en pure perte : cette action est *inefficace*. Désormais nous prendrons du zinc amalgamé.

Ces expériences conduisent aux lois suivantes :

1° Une force électromotrice se développe au contact de deux corps qui agissent chimiquement entre eux : l'un prend une tension positive $+\varepsilon$, l'autre une tension négative $-\varepsilon$. L'intensité de la force électromotrice se mesure par la valeur de cette tension.

2° Quand le circuit est ouvert, cette tension tend à annuler l'action chimique commencée; mais si l'on réunit les deux substances par un arc conducteur, on observe un courant allant du corps positif à la substance négative, et l'action chimique s'achève. Ce courant et cette action chimique sont deux phénomènes solidaires.

3° Les bases, les métaux attaqués et les métalloïdes basiques *sont négatifs*. Les acides, l'oxygène, le soufre, les corps halogènes et tous ceux qui jouent le rôle d'acide sont positifs.

IV. — IDÉES THÉORIQUES.

Pour expliquer ces lois, Ampère a supposé qu'au moment de se combiner, deux atomes de nature différente se chargent toujours de quantités égales de fluides contraires. L'oxygène, le soufre et les acides se chargeraient négativement : on les appelle corps *électronégatifs;* les métaux, le charbon et les bases se chargeraient positivement : on les nomme corps *électropositifs;* la combinaison des deux sortes d'atomes reproduit une molécule composée neutre.

Dès lors, toutes les fois qu'une molécule de zinc se dissout dans un acide, elle prend de l'électricité positive et rejette de la négative à l'extrémité de la lame de zinc, où nous constatons son existence par l'électromètre. Au contraire, une molécule d'acide, au moment de s'unir au métal, se charge négativement : c'est pour cela qu'elle abandonne au liquide l'électricité positive devenue libre. Quand cela est fait, l'action chimique s'enraye, puisque l'acide et le métal ont justement pris les électricités contraires à celles qu'ils doivent avoir pour se combiner; c'est

ainsi que le zinc pur ou le zinc amalgamé ne montrent aucun effet. Mais quand on réunit par un métal conducteur inattaquable le zinc et le liquide, les deux électricités opposées se recombinent, l'action chimique recommence, et l'on a alors deux phénomènes nécessairement liés : l'action chimique qui se produit continûment, et le courant qui résulte de la recomposition des fluides mis en liberté.

Développons cette théorie en prenant pour exemple le cas où l'on plonge dans l'acide sulfurique étendu un métal attaquable, le zinc amalgamé N Zn, et un métal inattaquable, le platine M Pt :

$$\underset{+}{M} \text{———} \underset{-}{Pt} \;\Big|\; \underset{+\;-}{H\,SO^4} \;\Big|\; \underset{+\;-}{H\,SO^4} \;\Big|\; \ldots \;\Big|\; \underset{+\;-}{H\,SO^4} \;\Big|\; \underset{+\;-}{H\,SO^4} \;\Big|\; \underset{+}{Zn} \text{———} \underset{-}{N}$$

Toute molécule d'acide sulfurique SO^4H est composée d'un radical $\underset{-}{SO^4}$ électrisé négativement, et d'un métal $\underset{+}{H}$ qui a une charge égale d'électricité positive. La première molécule, qui touche au zinc, tend à se décomposer. En vertu de l'affinité, le radical $\underset{-}{SO^4}$ se tourne et se porte vers $\underset{+}{Zn}$, et, puisqu'il est négatif, il décompose par influence l'électricité neutre de la lame, attire en $\underset{+}{Zn}$ la positive et repousse la négative en $\underset{-}{N}$ où elle s'accumule. Toutes les autres molécules de $\underset{+\;-}{H\,SO^4}$, qui sont comprises entre les deux métaux, s'orientent de la même manière par influence : la dernière tourne son hydrogène $\underset{+}{H}$ vers $\underset{-}{Pt}$, y attire l'électricité négative et repousse la positive en $\underset{+}{M}$. Les tensions contraires qui existent aux extrémités des deux métaux atteindront leurs limites quand l'attraction qui tend à les réunir sera égale à la force qui les a séparées, c'est-à-dire à l'affinité du zinc pour SO^4H ou à la force électromotrice.

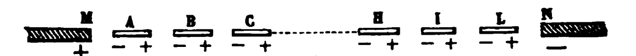
Les choses resteront dans le même état, sans action chimique continue, si l'on tient les deux métaux isolés; vient-on à réunir $\underset{+}{M}$ et $\underset{-}{N}$ par un conducteur, l'action chimique se complète. $\underset{+}{Zn}$ n'étant plus retenu par $\underset{-}{N}$ se combine avec $\underset{-}{SO^4}$ et rend libre $\underset{+}{H}$. $\underset{+}{H}$ passe de la première à la deuxième molécule; de même celle-ci cède son hydrogène à la troisième, et ainsi de suite, jusqu'à la dernière, qui laisse dégager son hydrogène $\underset{+}{H}$ contre $\underset{-}{Pt}$, qui est ramené à l'état naturel.

Ainsi une charge de fluide positif a été transportée avec une molécule

d'hydrogène, de rang en rang, du zinc au platine; une charge de fluide négatif s'est avancée avec une molécule de $\underset{+}{SO^4}$, de rang en rang, vers le zinc; une molécule de zinc a été dissoute d'un côté; une molécule d'hydrogène $\underset{+}{H}$ a été dégagée contre le platine, et tout se trouve ramené à l'état primitif. Après cela, le phénomène recommence, et l'action chimique devient continue.

Mais pendant qu'une charge positive se transporte d'un rang de $\underset{+}{Zn}$ à $\underset{-}{Pt}$ à travers le liquide, une charge égale s'élance de $\underset{+}{M}$ vers $\underset{-}{N}$ à travers les molécules A, B, C,..., H, I, L du conducteur interpolaire (*fig.* 278).

Fig. 278.



elle s'y propage de rang en rang, suivant l'hypothèse de M. de la Rive. En même temps, une charge négative partie de $\underset{-}{Pt}$ s'avance de molécule en molécule avec $\underset{-}{SO^4}$ dans le liquide, et de rang en rang à travers le conducteur de $\underset{-}{N}$ en $\underset{+}{M}$; un même mouvement électrique s'accomplit dans ce liquide et dans ce conducteur; il parcourt le circuit complet. La seule différence qu'il y ait dans ses deux parties, c'est qu'il se fait sans décomposition dans le conducteur et avec transport moléculaire dans le liquide.

V. — PREMIER TYPE DES PILES.

Couple électro-chimique. — L'ensemble de deux métaux différents plongés dans un liquide qui les attaque inégalement constitue un couple électromoteur. On vient de voir que, dans le cas où l'un des éléments est en platine et n'est point dissous, on développe une force électromotrice, et qu'elle fait naître aux extrémités M et N des tensions $+\varepsilon$ et $-\varepsilon$ qui la mesurent. Ces tensions varient avec la nature du liquide et du métal attaquable. Voici leur valeur déterminée par M. Edmond Becquerel, pour le cas de l'acide sulfurique :

Potassium	173	Cobalt	44
Zinc amalgamé	103	Bismuth	37
Zinc pur	100	Antimoine	35
Cadmium	79	Cuivre	35
Plomb	66	Argent	22
Étain	66	Mercure	31
Fer	61	Or	0
Aluminium	51	Platine	0
Nickel	45	Charbon	0

Si le couple est constitué par deux métaux attaquables, la force électromotrice est la différence de celles qui sont écrites dans le tableau. Ainsi, en combinant le zinc et le cuivre, ce qui est le cas habituel, on a une force électromotrice égale à $103 - 35 = 68$. Nous la représenterons en général par e, ce qui voudra dire qu'entre le zinc et le cuivre qui terminent un couple, il y a une différence de tension égale à e.

Un coup. peut être représenté par le symbole suivant, dans lequel A et A' figurent les extrémités des deux métaux immergés :

$$\overset{+e}{\text{A}} \text{———————— liq. ————————} \overset{-e}{\text{A}'}$$

Son effet est d'établir entre A et A' une différence de tension $2e$. Supposons qu'on mette A' en communication avec une source électrique donnant une tension E, A' se mettra en équilibre avec cette source et transmettra à A cette même tension E; et comme, d'autre part, la force électromotrice établit entre A' et A une différence $2e$, il faudra que A ait une tension $E + 2e$:

$$\overset{E+2e}{\text{A}} \text{———————— liq. ————————} \overset{E}{\text{A}'}$$

En général, on admet qu'un couple transmet de A' en A une tension quelconque en l'augmentant d'une quantité constante $2e$ qui mesure sa force électromotrice. Il résulte de là que, plaçant plusieurs couples à la suite les uns des autres, ils ajoutent leur tension du premier au dernier.

Piles. — Une *pile* est la réunion d'un nombre n de couples disposés à la suite, de façon que le cuivre de l'un touche au zinc du suivant; ses extrémités se nomment *pôles;* le positif est le cuivre du dernier couple, le négatif le zinc du premier. Si les deux pôles sont réunis par un conducteur, un courant naît, passe dans ce conducteur du cuivre au zinc et revient dans les couples du zinc au cuivre, c'est la somme des courants qui sont produits dans le même circuit par chacun des couples. Si les extrémités sont isolées et que le zinc soit en communication avec le sol, c'est-à-dire à l'état

naturel, les tensions croissent du premier au dernier élément de la quantité $2e$ à chaque couple; elles décroîtraient de la même quantité si le cuivre était à l'état naturel et le zinc isolé dans l'air. Ces deux cas sont représentés par le symbole suivant :

	1			2				n	
Zn	Liq.	Cu	Zn	Liq.	Cu	...	Zn	Liq.	Cu
terre, 0	...	$+2e$	$+4e$	...	$+2(n-2)e$	...	$+2(n-1)e$	...	$+2ne$
$-2ne$	...	$-2(n-1)e$	$-2(n-2)e$	...	$-4e$	...	$-2e$	...	0, terre

Pile à colonne. — Le premier modèle des piles (*fig.* 279) a été imaginé par Volta. Des disques égaux de cuivre et de zinc sont superposés alternativement, et chaque paire est séparee de la suivante par une rondelle de drap ou de carton mouillée. La colonne entière est soutenue par trois tiges de verre verticales A, B, C enchâssées dans un socle de bois D et maintenues à leur sommet par un disque percé de trois trous. Les lames de cuivre C et de zinc Z sont les *pôles;* on les met en communication, avec tous les appareils qu'on veut soumettre à leur action, par des fils métalliques que l'on appelle *réophores*.

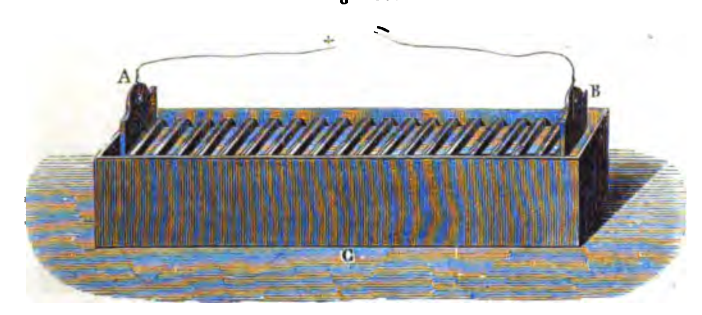
Fig. 279.



Les effets sont faibles si les rondelles de drap sont mouillées d'eau pure; mais la tension augmente quand on les imbibe avec une dissolution saline ou acide; alors les disques de zinc s'altèrent rapidement; on doit s'empresser de démonter la pile aussitôt qu'elle a servi, et quand on veut la disposer de nouveau, il faut décaper avec soin les faces des métaux qui sont en contact. On évite ces précautions et l'on abrége le temps des opérations en faisant à l'avance souder deux à

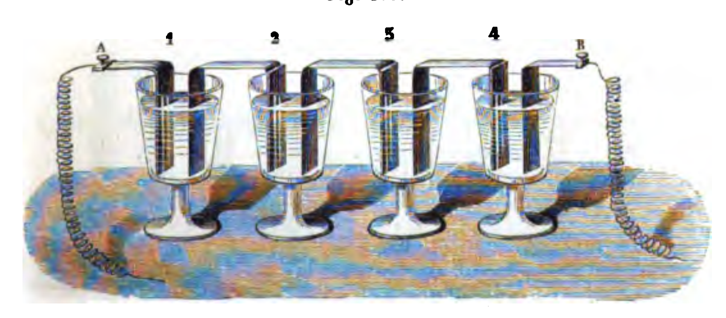
deux les disques de cuivre et de zinc, et en les mastiquant dans une auge horizontale de bois. Ils laissent entre eux des vides qui représentent la place occupée par les draps dans la pile à colonne. Il suffit de remplir ces intervalles avec de l'eau acidulée pour amorcer la pile, et de les vider pour qu'elle cesse d'agir. C'est la pile de Cruikshanks (*fig.* 280).

Fig. 280.



Pile à tasses. — Volta avait lui-même remplacé les disques par des lames rectangulaires recourbées sous la forme d'un U renversé, dont la branche antérieure est en cuivre et la postérieure en zinc (*fig.* 281). Elles

Fig. 281.

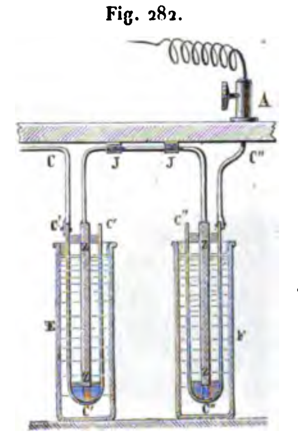


plongent dans des verres remplis d'eau acidulée, entre lesquels elles établissent une série de ponts. On trouve ici les mêmes alternatives de zinc, de liquide et de cuivre que dans la pile à colonne, répétées autant de fois qu'il y a de couples. Les vases sont bien isolés, et le liquide, dont la masse est considérable, ne s'altère que très-lentement.

La pile de Wollaston dérive naturellement de la pile à tasses. Que l'on

suppose tous les éléments de celle-ci (*fig.* 282) fixés à une traverse horizontale AB, on pourra les soulever tous à la fois et les soustraire ainsi à l'action du liquide, ou bien les plonger en même temps dans les verres, ce qui mettra à l'instant la pile en activité pendant le temps strictement nécessaire pour faire l'expérience que l'on aura en vue : c'est là ce que fit Wollaston.

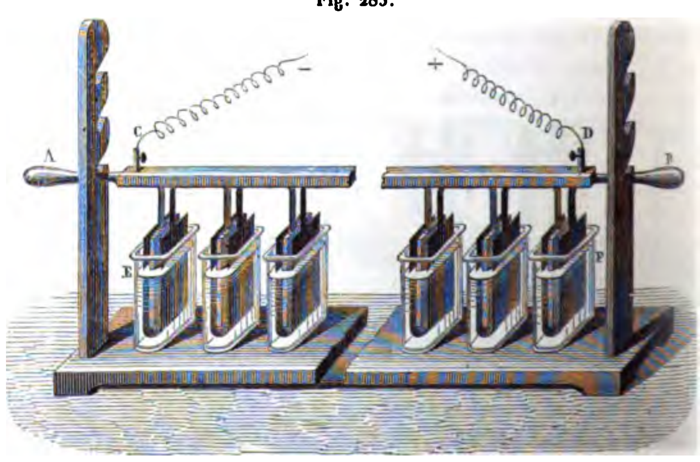
Fig. 282.



Il eut soin, en outre, de recourber les lames de cuivre autour de chaque zinc, afin d'augmenter la conductibilité de l'instrument, et il agrandit considérablement leurs dimensions. La pile de Wollaston est représentée *fig.* 282 et 283.

Quand ces piles ont été construites, on ne connaissait point la propriété du zinc amalgamé, et il y avait dans les auges une action chimique continue qui usait le zinc en pure perte. Aujourd'hui on remplace le zinc ordinaire par le zinc amalgamé, et l'action chimique ne se développe que pendant le travail de la pile.

Fig. 283.



Piles sèches. — Zamboni superposait des feuilles de papier un peu fort couvertes de zinc d'un côté et de bioxyde de manganèse de l'autre. On les débite à l'emporte-pièce en petits paquets de rondelles égales que l'on em-

pile dans le même ordre, au nombre de douze à quinze cents. On arme les deux extrémités de disques de cuivre, on comprime le paquet, on le lie par des cordonnets de soie, et on le préserve de l'air par une couche de soufre ou de gomme laque fondus.

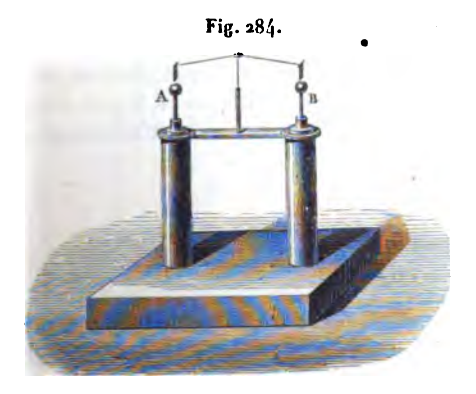
Le couple constituant de cette pile peut se représenter comme il suit :

— A ... Zinc | Bioxyde de manganèse, papier .. + B
— *e* + *e* + *e*

La force électromotrice se développe au point où se produit une action chimique entre le zinc qui s'oxyde et devient négatif, et le bioxyde qui cède de l'oxygène et devient positif. Le papier sert de conducteur entre un couple et le suivant ; il remplace le cuivre des piles ordinaires. Delezenne a constaté que ces piles ne fonctionnent qu'autant que le papier est un peu humide, qu'elles deviennent inactives au bout de plusieurs années, et qu'alors les surfaces en contact du zinc et du bioxyde se sont altérées notablement par l'effet prolongé de l'action chimique. Elles manifestent aux pôles une tension assez grande, mais ne produisent qu'un courant insignifiant.

Pour constater leur tension, on place verticalement deux piles (*fig.* 284)

Fig. 284.



réunies à la base et présentant à leurs sommets deux pôles de nom contraire A et B ; ces pôles attirent une aiguille tournante de gomme laque, terminée par deux lames de clinquant, qui les vient toucher à chaque demi-révolution, et qui est repoussée ensuite : il en résulte un mouvement de rotation qui se continue pendant plusieurs années.

Les deux boutons A et B étant également et inversement chargés, une

lame d'or *f* (*fig.* 285) placée à égale distance de ces deux pôles reste immobile, sollicitée par deux attractions contraires. Si l'on approche de E un

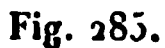
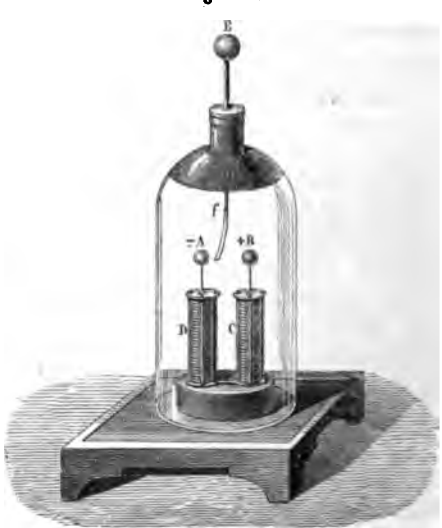


Fig. 285.



corps chargé positivement, la lame *f* devient positive, et elle est attirée par — A ; elle se portera, au contraire, sur + B si le corps approché est chargé négativement. C'est l'électroscope de Bohnenberger.

CHAPITRE II.

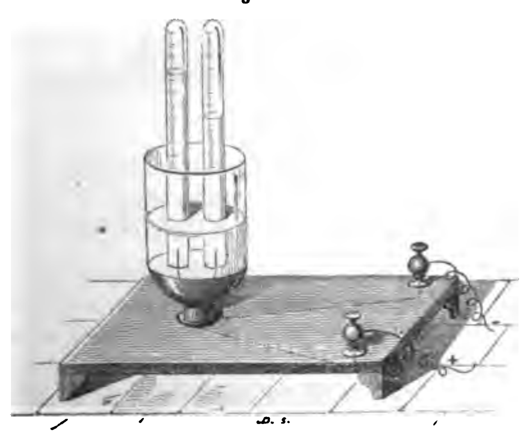
TRAVAIL CHIMIQUE DES COURANTS.

I. — ÉLECTROLYSE.

Quand on joint aux deux pôles de la pile deux fils conducteurs quelconques, et qu'on réunit leurs extrémités libres par un composé chimique liquide, capable d'être traversé par le courant, il est décomposé. Les deux conducteurs se nomment *électrodes*, le composé s'appelle *électrolyte*, et l'acte de la décomposition sous l'influence du courant reçoit le nom d'*électrolyse* ou d'*électrolysation*.

On fait les expériences avec l'appareil suivant (*fig.* 286), qui se com-

Fig. 286.



pose : 1° d'une cloche renversée au fond de laquelle on a coulé du mastic isolant; 2° de deux électrodes de platine qui traversent ce mastic; 3° de deux éprouvettes graduées destinées à recueillir les gaz. Voici ce que l'on observe avec divers composés.

Composés binaires. — I. Si la cloche contient de l'eau, celle-ci est décomposée : l'oxygène se dégage à l'électrode positive, et un volume double

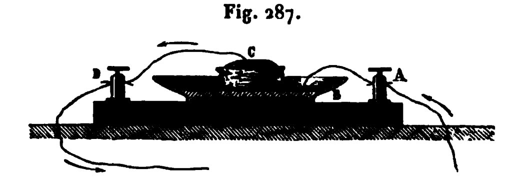
d'hydrogène se rassemble au pôle négatif. Si l'eau est pure, elle est très-peu conductrice, le courant est très-faible, et la décomposition très-lente; elle s'active si l'on ajoute quelques gouttes d'acide sulfurique qui augmentent la conductibilité. Cette expérience a été faite en 1800 par Carlisle et Nicholson.

II. Les dissolutions concentrées des acides bromhydrique, chlorhydrique, iodhydrique se séparent en hydrogène au pôle négatif, et en brome, chlore ou iode au fil positif.

III. Les chlorures, bromures, iodures, et en général les composés d'un métalloïde et d'un métal, dégagent ce métalloïde au pôle positif et laissent déposer le métal sur l'électrode négative.

IV. Les oxydes se comportent d'une manière analogue. Davy soumit à l'action d'une pile de 250 couples un fragment de potasse caustique; il vit l'oxygène se dégager au pôle positif, et au pôle négatif se rassembler de petits globules brillants d'un métal nouveau qu'il appela *potassium*. La même expérience, répétée avec la soude, donne le *sodium*. Pour recueillir ces métaux, on creuse à la surface du fragment une cavité C (*fig.* 287).

Fig. 287.



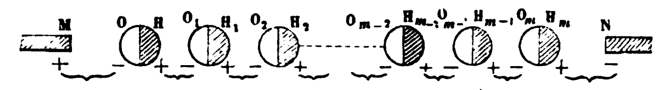
qu'on remplit de mercure, et on y plonge l'électrode négative. Au bout de quelque temps, ce mercure prend l'aspect d'un alliage, et il laisse le potassium pour résidu, quand on le distille dans l'huile de naphte.

Sels. — Les sels à acides minéraux abandonnent leur métal sur l'électrode négative; l'acide et l'oxygène se rendent au pôle positif. C'est ainsi que le sulfate de cuivre SO^3CuO donne Cu au pôle — et SO^3, O au pôle +. On explique cette décomposition en admettant que SO^3CuO est formé par la combinaison binaire d'un métal Cu et d'un radical composé ($SO^3, O = SO^4$) et que le courant ne fait autre chose que séparer ces éléments. L'hydrogène étant un véritable métal, l'eau aiguisée d'acide sulfurique pourra être considérée comme un sulfate d'eau SO^4H. Alors la loi de toutes les décompositions précédentes sera celle-ci : « Les composés binaires formés par un métal uni à un radical, c'est-à-dire à un métalloïde ou à un acide suroxygéné, se détruisent par le passage d'un courant; le radical se porte au pôle positif, et le métal au pôle négatif. »

Ces phénomènes s'expliquent, comme le courant, par la théorie électro-

chimique. Considérons le cas de l'eau. On se rappelle que la molécule d'eau est composée d'un atome d'oxygène négatif et d'un atome d'hydrogène positif. Aussitôt que la tension électrique se produit aux pôles M et N (*fig.* 288), l'action d'influence se manifeste. Elle oriente les molécules, attirant l'oxygène vers M et l'hydrogène vers N; et les actions attractives

Fig. 288.



ou répulsives sur les molécules contraires augmentant avec la tension, il arrive un moment où O se porte vers M, H_m vers N, et où tous les atomes intermédiaires se recombinent de l'un au suivant, comme cela est indiqué par les accolades, et reconstituent de nouvelles molécules d'eau, sur lesquelles l'action recommence. On voit qu'aucune action intermédiaire ne doit se manifester, et que les gaz ne se dégagent qu'au contact des électrodes.

Tous les cas d'électrolysation s'expliquent avec la même facilité. Nous nous contenterons de les représenter par les symboles suivants :

Composés binaires (chlorures).

+ M ——— Cl R | Cl R | ... | Cl R | Cl R ——— N −
+ − + | − + | | − + | − + −

Sels (sulfates).

+ M ——— SO^4 R | SO^4 R | ... | SO^4 R | SO^4 R ——— N −
+ − + | − + | | − + | − + −

Phénomènes de transport. — Quelquefois le transport des éléments mis en liberté est un peu plus complexe. Reprenons l'expérience de la *fig.* 273, le bocal contenant de la potasse et le vase poreux de l'acide sulfurique. Faisons passer un courant de la potasse à l'acide. Il se dégage de l'oxygène au pôle positif B, de l'hydrogène en A, et on finira par constater que l'acide et la potasse ont changé de place. Ce transport se fait comme il suit par des décompositions successives :

C

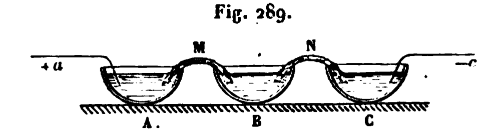
+ A ——— O K | O K || SO^4 H | SO^4 H ——— B −
+ − + | − + || − + | − + −

L'acide SO^4 traverse la cloison C pour former du sulfate de potasse du côté de + A; le potassium marche en sens inverse pour former le même

sel vers B ; ce sel est ensuite décomposé, et l'action ne se termine que lorsque tout l'acide et toute la potasse se sont portés aux pôles positif et négatif.

On doit à Davy des expériences plus curieuses. Il disposait à la suite l'une de l'autre trois capsules A, B, C (*fig.* 289) contenant : la première

Fig. 289.



de la potasse, la deuxième de l'eau, la troisième de l'acide sulfurique : il les réunissait par deux mèches d'amiante mouillée M et N, et faisait passer un courant de a en c :

$$\begin{array}{ccccccccccccccccc} & & & & & & \text{N} & & & & & \text{M} & & & & & \\ +a & \text{———} & \text{O K} & \mid & \text{O K} & \parallel & \text{O H} & \mid & \text{O H} & \parallel & \text{SO}^4\ \text{H} & \mid & \text{SO}^4\ \text{H} & \text{———} & c- \\ & + & -\ + & \mid & -\ + & \parallel & -\ + & \mid & -\ + & \parallel & -\ \ + & \mid & -\ \ + & - & \end{array}$$

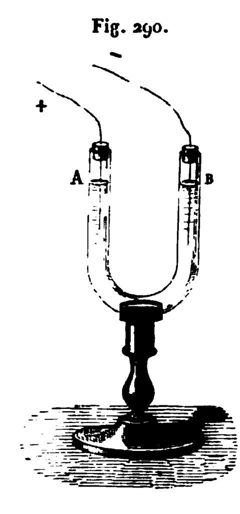
En considérant les mèches M et N comme des cloisons, on voit que le potassium traverse la première en allant vers $-c$, pendant que SO^4 marche vers $+a$. L'auge du milieu contient bientôt du sulfate neutre de potasse, qui, à son tour, se décompose en transportant SO^4 à $+a$ et K à $-c$. Par conséquent, le liquide doit rester toujours neutre dans la capsule B, et à la fin de l'opération ce liquide est de l'eau pure comme au commencement. Mais si l'on mettait dans les auges extrêmes de l'azotate de baryte et du sulfate de potasse, on verrait du sulfate de baryte se précipiter dans l'auge moyenne et échapper à toute décomposition ultérieure.

Actions secondaires. — 1° L'électrolyse se complique quelquefois d'actions secondaires. Si, par exemple, l'électrode négative est oxydable, elle est attaquée par l'oxygène et l'acide qui se portent à sa surface ; elle se dissout et reconstitue une quantité de sel équivalente à celle qui a été décomposée. Ainsi, lorsqu'on électrolyse du sulfate de cuivre avec une électrode positive en cuivre, une partie de ce métal se dissout pendant qu'un poids égal se dépose au pôle négatif, et la liqueur conserve la même composition : tout se réduit à un transport de métal du pôle positif au pôle négatif.

2° La dissolution peut se modifier par la réaction des éléments mis en liberté. Un sel de protoxyde de fer jaunit autour de l'électrode positive, parce que l'oxygène qui se dégage le suroxyde. Inversement, un sel de peroxyde se décolore au pôle négatif, parce que le fer se dissout dans la solution, qu'il ramène à un degré d'oxydation moindre. L'eau oxygénée s'électrolyse, mais une portion de son hydrogène est absorbée dans le liquide, qui redevient de l'eau ordinaire.

3° Quand on électrolyse des sels appartenant aux métaux des deux premières sections, l'acide et l'oxygène se portent au pôle positif, et le métal à l'électrode négative; mais comme ce métal décompose l'eau, il se transforme en oxyde et dégage de l'hydrogène. On fait l'expérience dans un tube en U (*fig.* 290) rempli de sulfate de soude coloré avec du sirop de violettes, et l'on voit la teinture rougir en A et verdir en B, ce qui indique la présence de l'acide et de l'alcali à ces deux extrémités. On recueille en outre de l'oxygène en A et de l'hydrogène en B.

Fig. 290.



4° On creuse dans un fragment de chlorhydrate d'ammoniaque un peu humide une cavité qu'on remplit de mercure, et on opère, comme le faisait Davy, avec la potasse (*fig.* 287). Aussitôt le mercure s'épaissit, gonfle et prend l'aspect d'un amalgame, en même temps qu'il se dégage du chlore au pôle positif. On sait que le sel AzH^4Cl est un composé binaire de chlore et d'ammonium AzH^4. L'ammonium forme avec le mercure un amalgame peu stable et qui bientôt se décompose.

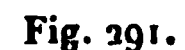
Composés des métalloïdes. — Les composés que forment les métalloïdes entre eux sont loin d'éprouver des effets aussi simples. Un grand nombre ne sont point conducteurs et ne peuvent être électrolysés, puisqu'ils ne laissent pas passer le courant : ce sont les chlorures de soufre et de phosphore, le sulfure de carbone, l'acide sulfurique anhydre, etc. Quelques autres peuvent transmettre le courant quand on les mêle avec des dissolvants conducteurs; mais, dans ce cas, ce sont vraisemblablement ces dissolvants qui se décomposent en produisant des actions secondaires que nous n'étudierons pas.

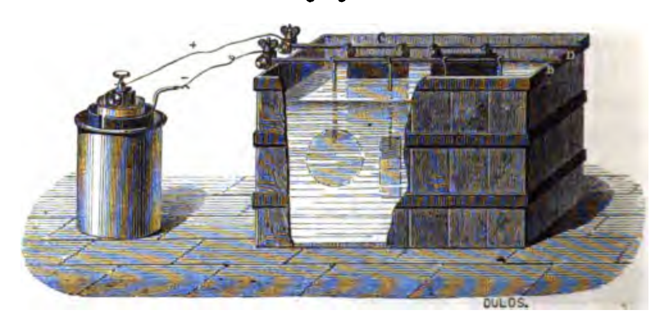
Galvanoplastie. — L'électrolyse donne lieu à une application importante : elle permet de mouler les métaux dans toutes sortes de formes en les précipitant de leurs dissolutions salines. Ce procédé, connu sous le nom de *galvanoplastie*, est dû à M. Jacobi, de Saint-Pétersbourg.

Pour reproduire par l'électrolyse un relief quelconque, il faut d'abord s'en procurer un moule en creux et rendre ce moule conducteur. S'il est en plâtre, on le trempe dans un bain de stéarine fondue et on le vernit ensuite avec de la plombagine. On peut également faire ce moule en gutta-

percha, que l'on chauffe et que l'on applique fortement sur l'objet à reproduire, le moule est ensuite enduit de plombagine.

Quelle que soit la matière dont il est fait, on le plonge dans une cuve remplie d'une dissolution saturée de sulfate de cuivre, en le suspendant à une baguette métallique B (*fig.* 291) qui communique avec le pôle négatif


Fig. 291.



d'une pile; le pôle positif est en relation avec une seconde baguette D qui porte une plaque de cuivre C. Le sel est décomposé; la plaque C se dissout et maintient la solution dans un état de concentration constant, en lui rendant le sulfate qu'elle perd; d'autre part, le cuivre se dépose sur le moule et le recouvre d'une couche solide, qu'il est facile ensuite d'enlever si l'on a eu soin de graisser le moule légèrement avant l'immersion dans le bain.

Dorure et argenture galvaniques. — Le même procédé permet de recouvrir un objet donné d'une mince couche d'or ou d'argent. Si cet objet est en cuivre, on commence par le recuire, et on le plonge encore chaud dans un bain d'acide azotique très-étendu, qui dissout l'oxyde superficiel; on le frotte ensuite avec une brosse, et on le lave à l'eau : c'est l'opération du dérochage. On achève de nettoyer la surface par le décapage, qui consiste à plonger les pièces dans un bain d'acide azotique, puis dans un mélange de cet acide, de sel marin et de suie, et enfin à les laver à l'eau pure. Les pièces ainsi préparées sont suspendues à l'électrode négative d'une pile et plongées dans un bain d'or, composé, par exemple, de 1 gramme d'or et 10 grammes de cyanure de potassium dissous dans 200 grammes d'eau. La baguette positive porte une lame d'or pour nourrir le bain.

Le cuivre, l'argent, le bronze, le laiton, le maillechort se dorent très-bien; mais le fer, l'acier, le zinc, l'étain, le plomb ont besoin d'être couverts d'une couche de cuivre électrolytique avant d'être trempés dans le bain d'or.

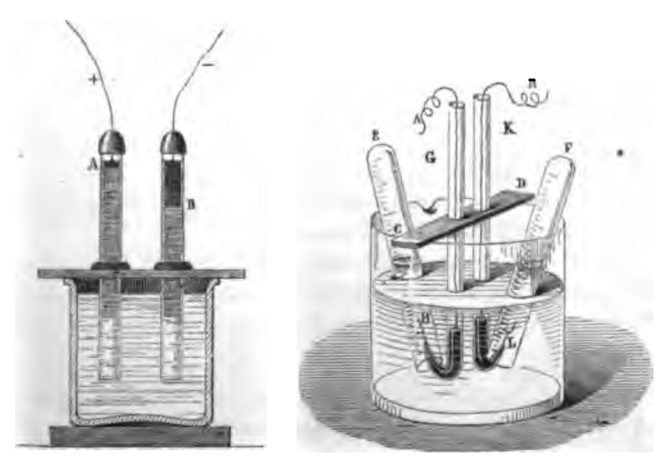
Pour argenter, on compose le bain avec 1 gramme de cyanure d'argent et 10 grammes de cyanure de potassium dissous dans 250 grammes d'eau. La baguette positive porte une lame d'argent.

II. — LOI DE FARADAY.

La théorie que nous avons donnée de l'électrolyse et les symboles qui ont servi à la représenter supposent qu'un même nombre d'atomes se décompose à la fois dans toutes les parties du circuit et qu'il soit proportionnel à la quantité d'électricité mise en circulation. Pour le prouver, on va comparer le poids des électrolytes décomposés à l'intensité des courants ou à la quantité d'électricité qui circule. Commençons par étudier la décomposition de l'eau.

Voltamètre. — Les vases dans lesquels on opère la décomposition de l'eau se nomment *voltamètres*. Un premier modèle a été décrit précédemment (*fig.* 286). On peut aussi mastiquer au sommet des éprouvettes elles-mêmes les fils de platine qui descendent jusqu'à l'ouverture inférieure (*fig.* 292), et plonger les éprouvettes dans l'eau acidulée. Quelquefois

Fig. 292. Fig. 293.



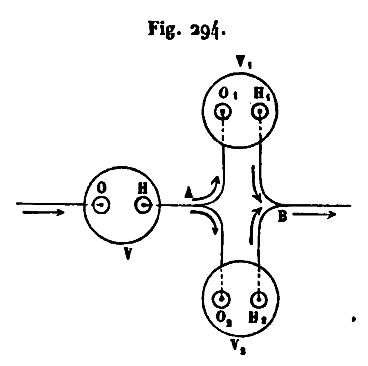
enfin on soude à la lampe les électrodes dans des tubes de verre recourbés G et K qui supportent les cloches E et F (*fig.* 293).

Si l'on essaye l'un après l'autre deux voltamètres de forme quelconque dans un même courant, on s'apercevra qu'ils donnent plus ou moins de gaz dans le même temps. Cela tient à ce qu'en interposant un voltamètre dans le circuit on diminue la conductibilité et, par suite, l'intensité du courant : beaucoup si les électrodes sont fines et éloignées, très-peu si elles sont larges et rapprochées.

Mais lorsqu'on place à la fois dans le même circuit plusieurs voltamètres à la suite l'un de l'autre, les conditions sont très-différentes ; ils sont traversés tous par le même courant, et l'on reconnaît que la même quantité d'eau se décompose dans chacun d'eux, quelle que soit leur différence d'action quand on les emploie individuellement. De là, cette première loi fondamentale : *Le même courant décompose toujours la même quantité d'eau dans le même temps.*

Cette quantité d'eau décomposée varie avec l'intensité du courant. Faraday le montre de la manière suivante. Après avoir fait passer le courant par un premier voltamètre V (*fig.* 294), il le divise au point A en deux rameaux formés par des conducteurs identiques et traversant deux voltamètres identiques V_1 et V_2; puis il réunit ces rameaux en un tronc unique B rejoignant l'autre pôle. Les courants qui traversent V_1 et V_2 sont les moitiés de celui qui circule dans V. Or, on trouve dans chacun des voltamètres V_1 et V_2 une quantité de gaz égale à la moitié de celle que contient V. Donc : *Les courants décomposent dans un temps donné des quantités d'eau proportionnelles à leur intensité.*

Fig. 294.



Si l'on convient de prendre pour unité d'intensité celle du courant qui dégage 1 gramme d'hydrogène en une minute, l'intensité i d'un courant quelconque sera exprimée par le poids p d'hydrogène dégagé en une minute.

$$i = p.$$

La quantité d'électricité qui circule dans un conducteur est proportionnelle à l'intensité p et à la durée t du courant ; d'un autre côté, le poids total P de l'hydrogène dégagé est égal au produit pt ; par conséquent, P mesurera la quantité d'électricité e,

$$e = P = pt.$$

Cette quantité d'électricité sera égale à l'unité si $P = 1$, c'est-à-dire si le poids total de l'hydrogène recueilli est égal à l'unité; et comme on est convenu de représenter par 1 l'équivalent de cet hydrogène, on voit que l'unité d'électricité est celle qui décompose 1 équivalent d'eau.

En résumé :

1° L'unité d'intensité est celle du courant qui dégage 1 gramme d'hydrogène en une minute;

2° L'intensité d'un courant se mesure par le poids d'hydrogène dégagé en une minute ;

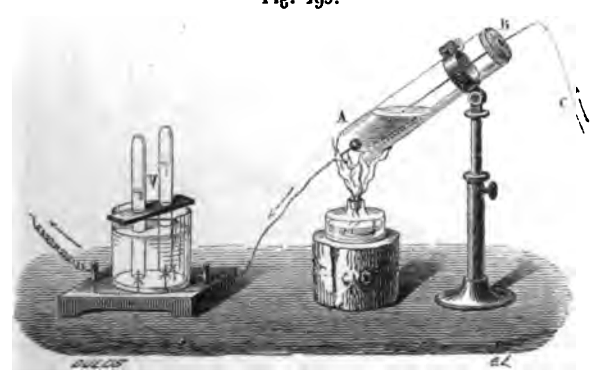
3° L'unité d'électricité est la quantité qui décompose 1 équivalent d'eau ;

4° La quantité d'électricité se mesure par le poids de l'hydrogène qu'elle dégage.

Loi de Faraday. — Cela posé, comparons les proportions des divers électrolytes qu'une même quantité d'électricité décompose. Pour cela, Faraday place à la suite l'un de l'autre un voltamètre et l'appareil où se décompose l'électrolyte, et il fait passer dans ce système un courant quelconque. Il mesure le volume et calcule le poids d'hydrogène dégagé dans le voltamètre : ce poids exprime la quantité d'électricité qui a passé. Quand il est égal à l'unité, 1 équivalent d'eau a été décomposé; or l'expérience prouve que 1 équivalent de l'électrolyte est décomposé en même temps.

Les premières expériences ont été faites avec des solutions concentrées des acides chlorhydrique, bromhydrique et iodhydrique qu'on plaçait dans un voltamètre à la suite du premier, où était l'eau acidulée. Les quantités d'hydrogène furent égales dans tous les deux.

Fig. 295.



Faraday décomposa ensuite le protochlorure d'étain, dans un tube AB (*fig.* 295). Le courant arrivait par une électrode positive B de graphite.

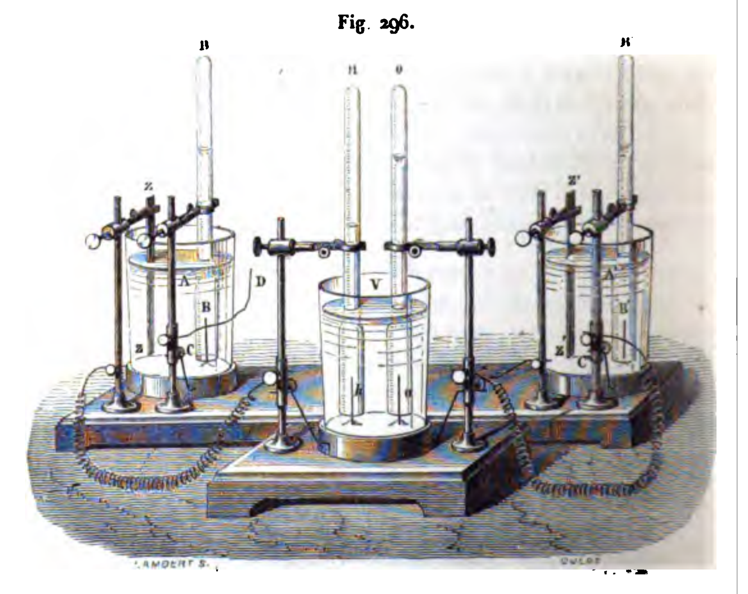
Après l'action, une masse d'étain fondu s'était rassemblée en A, et quand le poids d'hydrogène dégagé dans le voltamètre V fut égal à l'unité, le poids de l'étain déposé par le courant se trouva égal à 58,53, nombre qui diffère peu de l'équivalent de l'étain.

Il en fut de même de l'oxyde et du borate de plomb, et en général de tous les électrolytes. On peut donc énoncer la loi suivante : *Toutes les fois qu'on électrolyse un composé binaire ou un sel, l'unité d'électricité met en liberté 1 équivalent du métalloïde ou de l'acide.*

Actions chimiques dans les piles. — Nous avons montré (page 318) que la même circulation électrique se fait dans le courant extérieur et dans la pile ; il est donc probable qu'il y a dans ces deux parties des actions chimiques équivalentes. Cette loi énoncée par Matteucci a été vérifiée comme il suit par Daniell :

Il disposa la pile de manière à pouvoir recueillir l'hydrogène qui se dégage sur la lame de cuivre (*fig.* 296).

Fig. 296.



Le premier élément de cette pile est plongé dans le vase A ; il se compose d'une lame de zinc ZZ qui est le pôle négatif et d'un fil de platine B qui remplace l'élément cuivre. Ce fil est recouvert d'une cloche BB et communique au zinc suivant par CD. Tous les couples sont liés entre eux

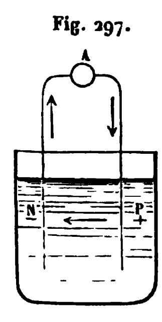
de la même manière jusqu'au dernier qui est figuré en A'. On ferme le circuit en réunissant les deux pôles avec les deux extrémités *o* et *h* d'un galvanomètre V, et au bout d'un certain temps on peut mesurer les quantités de gaz dégagées. Or Daniell a reconnu qu'elles étaient égales soit dans les cloches des couples, soit dans celle du voltamètre.

En général, on peut imaginer une pile composée, comme on le voudra, de couples absolument quelconques orientés les uns dans un sens, les autres en sens opposé, et l'on peut réunir les pôles de cette pile par une chaîne de voltamètres contenant tous les électrolytes possibles. Quand on fermera le circuit, « l'électrolysation se fera dans tous les liquides comme si un même courant traversait le circuit du pôle positif au pôle négatif dans le conducteur extérieur, et du pôle négatif au pôle positif dans la pile ; et, quand 1 unité d'électricité dynamique aura parcouru le circuit total, il y aura 1 équivalent de liquide décomposé soit dans chacun des voltamètres, soit dans chacun des couples actifs, de façon que le travail chimique sera égal dans toutes les auges. »

III. — POLARISATION DES ÉLECTRODES. — PILE A COURANT CONSTANT.

Polarisation des électrodes. — Quand on fait passer le courant d'une pile A à travers un électrolyte quelconque (*fig.* 297), le radical se porte au pôle positif P et la base au pôle négatif N, et tous deux s'accumulent au voisinage des surfaces des électrodes. Si l'on vient ensuite à remplacer la pile A par un galvanomètre, ce radical et cette base se recombinent, le premier est positif en P, la seconde négative en N, et il se produit dans le sens PAN un courant contraire à celui qui a déterminé l'électrolysation. Ce phénomène était connu depuis longtemps ; c'est M. Becquerel qui l'a expliqué par la réaction des éléments mis en liberté. Il se manifeste toutes les fois que ces éléments s'accumulent contre les électrodes, même quand ce sont des gaz, comme dans le cas de la décomposition de l'eau.

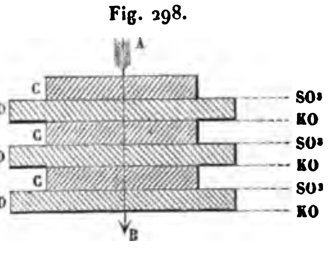
Fig. 297.



Il est clair que le même effet ne ferait que se multiplier si, au lieu d'un seul vase à décomposition, on en mettait plusieurs à la suite l'un de l'autre, ou si l'on plaçait dans une même auge une série de cloisons métalliques successives ; chacune d'elles fonctionnerait comme électrode, positive d'un côté et négative de l'autre ; c'est à peu près ce que faisait Ritter. Il com-

posait des piles inactives par elles-mêmes, en empilant des disques de cuivre CCC (*fig.* 298), séparés par des draps DDD imbibés d'une dissolution saline, par exemple de sulfate de potasse, et il les soumettait pendant un certain temps à l'action d'un courant AB. Alors l'acide sulfurique se portait à la partie supérieure de tous les draps, la potasse à la partie inférieure; chacun de ces draps devenait un couple actif séparé du suivant par un conducteur métallique, et leur ensemble constituait une pile dont le pôle positif était en A et le négatif en B. En réunissant ces pôles par un conducteur, on obtenait un courant contraire à celui qui avait déterminé la décomposition. Ce courant se produit encore quand la pile est mouillée d'eau acidulée, mais il est plus faible. Il n'a pas lieu quand les draps sont mouillés de sulfate de cuivre, car l'action du courant AB se réduit alors à dissoudre du cuivre à la face supérieure des disques et à le déposer à la face inférieure. L'effet n'a pas lieu davantage avec l'acide azotique, car l'oxygène se combine avec le cuivre, et l'hydrogène est absorbé par le liquide, qu'il réduit sans s'accumuler sur les surfaces.

Fig. 298.



Quand les électrodes se trouvent dans l'état qui détermine un courant de réaction, on dit qu'elles sont *polarisées :* cela signifie qu'elles sont recouvertes des éléments que le courant a séparés.

Résistance au passage. — Si ce courant de réaction se montre après que la pile a fonctionné, il est naturel de penser qu'il agit aussi pendant qu'elle travaille, et puisqu'il est contraire, il doit diminuer l'intensité du courant primitif comme s'il faisait naître une résistance au passage de l'électricité. C'est ce qui se produit dans la pile de Ritter : aussi voit-on qu'elle diminue peu à peu et considérablement l'intensité du courant qu'on dirige à travers elle, et quand il est devenu constant, il est la différence entre ceux que produiraient séparément dans le même circuit la pile active que l'on emploie et la pile de Ritter rendue active par la première.

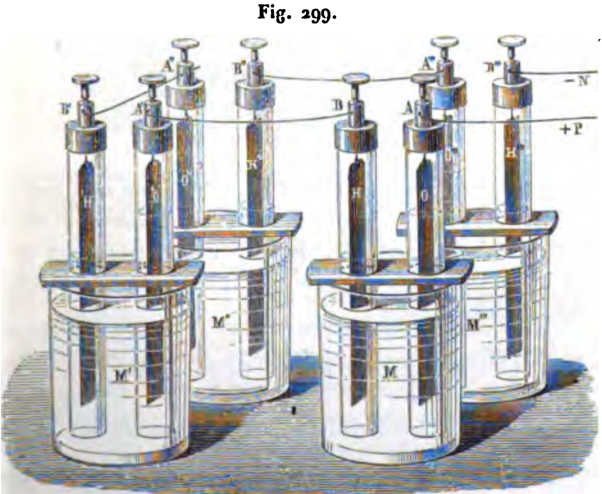
La résistance au passage est nulle dans tous les voltamètres où les électrodes ne se polarisent pas : par exemple, quand on décompose du sulfate de cuivre par deux lames de cuivre, ou de l'acide azotique étendu par deux fils de cuivre; et l'on peut interposer dans l'auge un nombre quelconque de diaphragmes sans diminuer l'intensité du courant d'une manière notable.

Pile à gaz. — Mais cette résistance existe, et la polarisation est très-intense, toutes les fois que les éléments décomposés restent sur les électrodes; par exemple, dans un voltamètre (*fig.* 292, p. 331), l'oxygène et l'hydrogène se condensent sur le platine en prenant : l'un l'électricité négative, l'autre la positive; il se produit une tension et une circulation des molécules d'eau intermédiaires.

Pt	+							−	Pt'
A	O	HO	HO	...	HO	HO	H		B
	−	+ −	+ −		+ −	+ −	+		

Au moment où l'on réunit les lames de platine par un conducteur extérieur, un courant circule, l'oxygène $\underset{-}{O}$ se combine avec l'hydrogène $\underset{+}{H}$ de la première molécule d'eau, les suivantes échangent leur oxygène, et la dernière cède le sien à $\underset{+}{H}$ avec lequel il se combine; il s'est fait une molécule de plus et il a circulé un équivalent électrique capable de décomposer une molécule d'eau dans un voltamètre extérieur. M. Grove a utilisé cette propriété pour construire une *pile à gaz*. La *fig.* 299 représente cette pile dont chaque élément est un simple

Fig. 299.



voltamètre. Des lames de platine platiné sont mastiquées dans deux cloches qu'on remplit d'oxygène et d'hydrogène, et qu'on réunit de l'une à la suivante comme dans les piles ordinaires.

Piles à courant constant. — Dans les piles que nous avons fait connaître, il y a trois causes qui affaiblissent le courant : 1° des bulles d'hydrogène se dégagent sur les lames de cuivre; elles s'interposent entre les éléments et diminuent la conductibilité; 2° l'hydrogène naissant est con-

densé par la surface du métal et produit une résistance au passage de l'électricité ; 3° l'acide sulfurique se transforme en sulfate de zinc. Ce sel est électrolysé par le courant et dépose sur les cuivres une couche de zinc qui, par sa réaction, détermine un courant inverse.

Il faut donc éviter ce dégagement d'hydrogène et ce dépôt de zinc. A cet effet, M. Becquerel a imaginé le principe des piles à deux liquides (*fig.* 300). Mettons du sulfate de cuivre et une lame de cuivre dans un vase

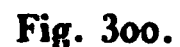
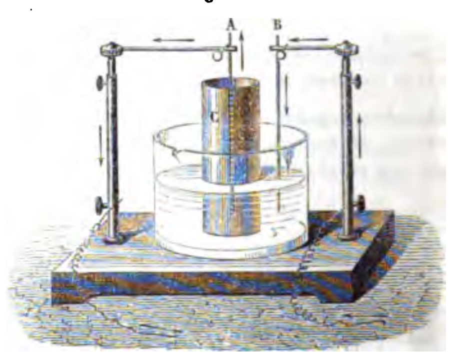


Fig. 300.



poreux C ; plongeons celui-ci dans de l'eau acidulée où se trouve une lame de zinc B, et réunissons plusieurs éléments semblables pour former une pile. Tous les zincs seront négatifs, les cuivres positifs, et le courant extérieur ira du cuivre au zinc extrême. La décomposition se fera comme il suit dans les deux liquides :

$$\underset{-}{B}\ \underset{+}{Zn}\ \underset{-}{SO^4}\ \underset{+}{H} \mid \underset{-}{SO^4}\ \underset{+}{H} \mid \ldots \mid \underset{-}{SO^4}\ \underset{+}{H} \parallel \underset{-}{SO^4}\ \underset{+}{Cu} \mid \ldots \mid \underset{-}{SO^4}\ \underset{+}{Cu} \mid \underset{-}{SO^4}\ \underset{+}{Cu}\ \underset{-}{Cu}\ \underset{-}{A}$$

Le cuivre se déposera sur le cuivre $\underset{-}{Cu}$, SO^4 se portera au zinc $\underset{+}{Zn}$, qui se dissoudra ; il n'y aura aucune polarisation d'électrodes, puisqu'il ne se dégage aucun gaz, et le courant restera constant.

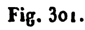
Remplaçons maintenant le sulfate de cuivre par de l'acide azotique, et le cuivre par du platine :

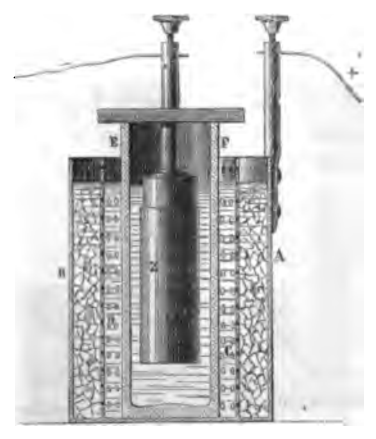
$$\underset{-}{B}\ \underset{+}{Zn}\ \underset{-}{SO^4}\ \underset{+}{H} \mid \underset{-}{SO^4}\ \underset{+}{H} \mid \ldots \mid \underset{-}{SO^4}\ \underset{+}{H} \mid \underset{-}{AzO^6}\ \underset{+}{H} \mid \ldots \mid \underset{-}{AzO^6}\ \underset{+}{H} \mid \underset{-}{AzO^6}\ \underset{+}{H}\ \underset{-}{Pt}\ \underset{-}{A}$$

L'hydrogène $\underset{+}{H}$ se portera sur le platine $\underset{-}{Pt}$; il ne se dégagera pas parce qu'il sera absorbé par l'acide azotique, et le courant n'éprouvera aucun

affaiblissement. Tels sont les moyens proposés par M. Becquerel pour détruire toute polarisation. MM. Daniell, Grove et Bunsen les ont appliqués dans la construction des appareils suivants.

Le couple de Daniell (*fig.* 301) se compose : 1° d'un vase de cuivre AB


Fig. 301.



divisé en deux compartiments concentriques par une feuille de cuivre CD percée de trous; on remplit le compartiment extérieur avec des cristaux de sulfate de cuivre qui se dissolvent à mesure que la décomposition du sel se fait; 2° d'un vase poreux de porcelaine dégourdie EF, qui contient de l'eau acidulée; 3° d'un gros cylindre de zinc amalgamé Z, qui plonge dans cette eau et qui communique à l'extérieur par une tige de cuivre centrale. Cette pile demeure constante pendant plus de six heures, et même davantage, si l'on a soin de renouveler l'acide étendu dans le vase poreux.

Fig. 302.

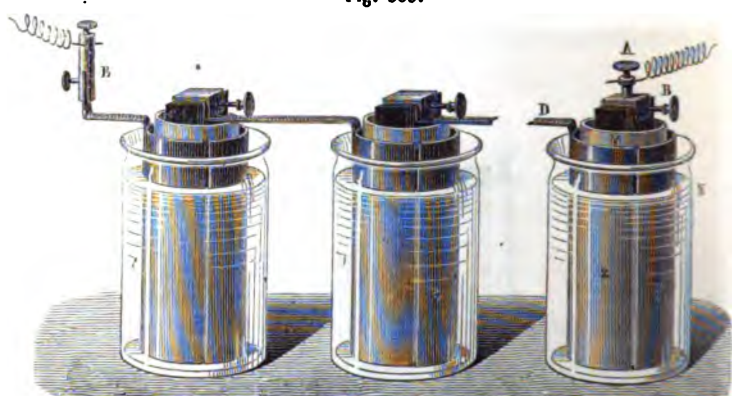


L'élément de Grove (*fig.* 302) est enfermé dans un vase de verre aplati contenant de l'eau acidulée. Une lame de zinc amalgamée ZZ, repliée sur elle-même et portant un bouton B, forme le pôle négatif. Le vase poreux V, qui est très-plat, est placé entre les deux faces internes du zinc; il contient de l'acide azotique concentré; enfin une feuille très-

mince de platine P, qui communique avec le bouton A, forme le pôle positif. Cette pile est la plus énergique qu'on connaisse, mais elle est très coûteuse à cause du platine qu'elle exige.

M. Bunsen a imaginé de remplacer le platine par du charbon, et par là

Fig. 303.



il a rendu la pile de Grove beaucoup plus usuelle. La *fig*. 303 montre plusieurs couples de cette pile montés avec tous leurs accessoires.

CHAPITRE III.

LOIS DE OHM.

I. — CAS DES PILES THERMO-ÉLECTRIQUES.

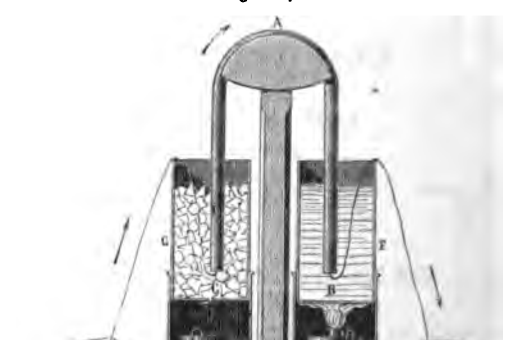
Quand on réunit les pôles d'une pile par un conducteur dont les conditions sont invariablement fixées, on obtient un courant d'une intensité déterminée. Mais si l'on vient à ajouter une portion métallique ou liquide à ce conducteur, ou bien à la supprimer, on voit l'intensité diminuer ou augmenter. Cela montre que les corps traversés par l'électricité lui opposent une résistance et en diminuent la quantité. On va se proposer de calculer l'intensité du courant engendré quand on connaît : 1° le nombre, l'étendue et l'espèce des éléments de la pile; 2° le nombre, l'étendue et l'espèce des conducteurs interpolaires. Ce problème a été résolu théoriquement par Ohm, et ses formules ont été vérifiées d'abord par Fechner. Un peu plus tard, elles furent retrouvées expérimentalement par Pouillet, qui ignorait les travaux de Ohm.

Piles thermo-électriques. — Pour étudier d'abord le cas le plus simple, celui d'un élément thermo-électrique, Pouillet avait préparé plusieurs cylindres de bismuth identiques, présentant la forme d'un U renversé (*fig.* 304). Aux extrémités C et B il soudait deux fils de cuivre gros et courts, CE et BD, et il plongeait les deux soudures dans deux vases, G et F, dont l'un était maintenu à 0 degré, et dont l'autre était porté à la température de 100 degrés. L'énergie de tous ces éléments était sensiblement égale. M. Pouillet en prit deux, ferma les deux circuits par des fils différents et fit varier successivement la longueur, la section et la matière des conducteurs.

1° Il réunit les deux pôles de l'élément n° 1 par un fil de cuivre de longueur l_1, ceux de l'élément n° 2 par un fil pareil de longueur l_2, et enroula ces fils en sens inverse sur le cadre d'un même galvanomètre, en faisant l_1 tours avec le premier et l_2 tours avec le second. Les actions exer-

cées sur l'aiguille étaient opposées et proportionnelles aux produits des

Fig. 304.



intensités I_1 et I_2 par l_1 et l_2. Le galvanomètre ne fut pas dévié, ce qui prouvait que les actions étaient égales et qu'on avait

$$I_1 l_1 = I_2 l_2 \quad \text{ou} \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{l_2}{l_1}.$$

Les intensités des courants engendrés par un couple thermo-électrique sont, toutes choses égales d'ailleurs, en raison inverse des longueurs du circuit.

2° Répétons la même expérience avec deux fils de même nature, égaux en longueur, ayant des sections différentes s_1, s_2. Pour rendre égales les deux actions exercées sur l'aiguille, il faut que les nombres de tours soient s_2 pour le premier et s_1 pour le second, ce qui donne

$$I_1 s_2 = I_2 s_1, \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{s_1}{s_2}.$$

Les intensités sont, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnelles aux sections du circuit.

3° En prenant des conducteurs de mêmes longueur et section, mais formés avec des matières différentes, les intensités sont proportionnelles à une constante spécifique c. Ces résultats se résument dans la formule

$$(1) \qquad I = A\frac{cs}{l};$$

c est le *coefficient de conductibilité* du métal qui constitue le conducteur; on l'exprime en nombre par le rapport de cette conductibilité à celle d'un métal convenu, qui est le cuivre pur ou le mercure. A ne dépend que de l'élément : c'est l'intensité du courant quand c, s et l sont égaux à l'unité; c'est la mesure de sa *force électromotrice*.

Conducteurs équivalents. — Longueur réduite. — Résistance. — Lorsque deux fils différents par leurs longueurs l, l', leurs sections s, s', et leurs conductibilités c, c', sont joints aux deux extrémités d'un même couple, les intensités sont

$$I = A\frac{cs}{l}, \quad I' = A\frac{c's'}{l'}.$$

Elles deviennent égales si l'on a $\frac{cs}{l} = \frac{c's'}{l'}$.

Dans ce cas l'un des fils peut remplacer l'autre; on dit qu'ils sont *équivalents*.

D'après cela, on pourra remplacer un fil (c, s, l) par un fil normal dont la conductibilité c' et la section s' seraient égales à l'unité, et dont la longueur r serait

$$(2) \qquad r = \frac{l}{cs}.$$

r se nomme la *longueur réduite* ou la *résistance* du conducteur c, s, l. La formule qui exprime l'intensité du courant devient

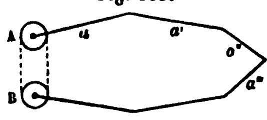
$$(3) \qquad I = \frac{A}{r}.$$

Si l'on considérait maintenant une pile de n éléments et que les forces électromotrices de chaque élément fussent A, A', A",..., l'intensité totale de I serait égale à la somme des intensités partielles, et l'on aurait

$$(4) \qquad I = \frac{A + A' + A'' + \ldots}{r} = \frac{\Sigma A}{r}.$$

Circuits complexes. — Les pôles A et B d'un couple sont réunis par plusieurs fils successifs a, a', a'', a''' de nature, de section et de longueur différentes. Quelle est l'intensité de courant (*fig.* 305)?

Fig. 305.



Soient $c, l, s, c', l', s', c'', l'', s'', \ldots$ les données relatives à chacun des fils $a, a', a'', \ldots$; ceux-ci peuvent être remplacés par leurs longueurs réduites r, r', r'',...,

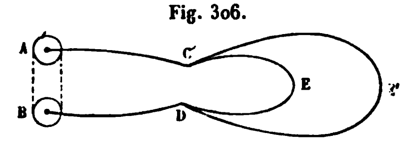
$$r = \frac{l}{cs}, \quad r' = \frac{l'}{c's'}, \quad r'' = \frac{l''}{c''s''}, \ldots.$$

Après cette substitution, le circuit se composera d'une suite de conducteurs qui auront la même section $s=1$, la même conductibilité $c=1$, et une longueur totale $r+r'+r''$,.... L'intensité sera

$$I = \frac{A}{r+r'+r''+\ldots} = \frac{A}{\frac{l}{cs}+\frac{l'}{c's'}+\frac{l''}{c''s''}+\ldots}.$$

Circuits dérivés. — Les deux pôles A et B sont réunis (*fig.* 306) : 1° par deux fils AC et BD dont la longueur réduite est r; 2° à partir de C et de D par deux autres conducteurs CED et CE'D, dont les longueurs réduites sont r' et r'' : quelles sont les intensités des courants : 1° dans le tronc unique AC et BD; 2° dans chacune des branches CED et CE'D?

Fig. 306.



Remplaçons r' et r'' par deux fils équivalents de conductibilité et de longueur égales à l'unité, et de sections x' et x'', nous aurons, d'après la formule (2),

$$r' = \frac{1}{x'}, \quad r'' = \frac{1}{x''}.$$

Les deux fils CED, CE'D se trouveront ainsi remplacés par deux autres, qui auront la même longueur et qui agiront comme un conducteur unique dont la section serait $x'+x''$:

$$x'+x'' = \frac{1}{r'}+\frac{1}{r''} = \frac{r'+r'}{r'r''},$$

et qui aurait pour longueur réduite $\frac{l}{cs} = \frac{1}{x'+x''} = \frac{r'r''}{r'+r''}$. En ajoutant à cette longueur celle de AC et BD, qui est r, on n'a plus qu'un circuit unique dont la longueur réduite totale est $r+\frac{r'r''}{r'+r''}$. Alors l'intensité du courant, devient, par la formule (3),

$$I = \frac{A(r'+r'')}{r(r'+r'')+r'r''}.$$

Quant aux intensités i' et i'' dans les deux conducteurs dérivés CED et CE'D, on les obtient en admettant que l'intensité totale se partage en deux autres proportionnellement aux sections x' et x''. Cela donne

$$\frac{i'}{i''} = \frac{x'}{x''} = \frac{r''}{r'},$$

$$i' = (i'+i'')\frac{r''}{r'+r''} = \frac{Ar''}{r(r'+r'')+r'r''},$$

$$i'' = (i'+i'')\frac{r'}{r'+r''} = \frac{Ar'}{r(r'+r'')+r'r''}.$$

On résoudrait tout aussi aisément le cas général où il y aurait un nombre quelconque de dérivations.

II. — CAS DES PILES HYDRO-ÉLECTRIQUES.

Ces lois si simples ne s'appliquent pas aux couples hydro-électriques ; on va en comprendre la raison. Le courant traverse non-seulement la résistance extérieure R, mais aussi le liquide de la pile, où il éprouve une seconde résistance que nous désignerons par r. La formule doit donc être

$$I = \frac{A}{R + r}.$$

C'est aussi celle qui, à la rigueur, devrait être appliquée au couple thermo-électrique ; mais comme les cylindres de bismuth et d'antimoine qu'on emploie sont très-gros, leur résistance r est très-faible, elle peut être négligée, et la formule se simplifie.

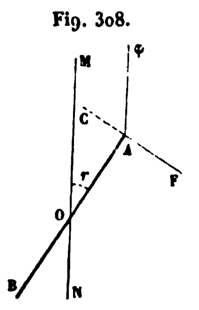
Boussoles des sinus et des tangentes. — Pour vérifier cette formule, et, en général, pour mesurer les intensités des courants, on emploie les *boussoles des sinus et des tangentes* (*fig.* 307). GH est le cadre vertical d'un galvanomètre au centre duquel est une boussole horizontale DIE. Le tout est mobile autour d'un axe vertical au centre d'un cercle azimutal AB qui est fixe, et une alidade C mesure sur ce cercle les déplacements du cadre GH. On peut employer cet appareil de deux manières : ou bien opérer comme avec un galvanomètre ordinaire, c'est-à-dire le placer dans le méridien et observer la déviation de l'aiguille : alors l'intensité est proportionnelle à la tangente de la déviation ; ou bien, après avoir placé le cadre dans le méridien, le tourner jusqu'à ce qu'il soit parallèle à l'aiguille : alors l'intensité est proportionnelle au sinus du déplacement du cadre. Commençons par ce dernier cas.

Fig. 307.



I. Plaçons d'abord le cadre dans le méridien magnétique, et figurons par MN (*fig.* 308) le plan de ce méridien qui renferme le cadre GH, l'aiguille I et la ligne 0-180 du cercle DE. Au moment où un courant passera dans les fils, l'aiguille se déplacera; alors faisons tourner le cadre dans le sens de la déviation δ jusqu'à ce que l'aiguille, le cadre et la ligne 0-180 se retrouvent confondus dans un autre plan vertical OA, et mesurons le déplacement MOA $= r$.

Fig. 308.



L'intensité sera proportionnelle au sinus de l'angle r.

En effet, l'action du courant se réduit à un couple qui agit suivant AF perpendiculairement au cadre, et dont le moment C est proportionnel à l'intensité I et au moment magnétique M de l'aiguille; on aura

$$C = KIM.$$

Or, comme l'aiguille sera en équilibre entre la force terrestre φ qui agit dans le méridien magnétique, et l'action F du courant, il faut que la composante AC de φ ou $\varphi \sin r$ soit égale à F

$$AC = \varphi \sin r = F.$$

En multipliant par la longueur $2l$ de l'aiguille,

$$2l\varphi \sin r = 2lF.$$

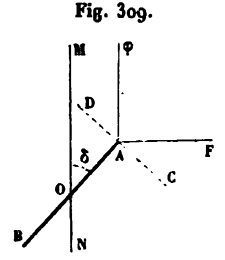
$2l\varphi$ est le moment magnétique M de l'aiguille, $2lF$ est le moment C du couple produit par le courant, et l'on a

$$M \sin r = C = KIM, \quad I = \frac{1}{K} \sin r.$$

Ce qui veut dire que l'intensité est indépendante du moment magnétique, et qu'elle est proportionnelle au sinus du déplacement r de l'alidade C. De là le nom de *boussole des sinus* donné à l'instrument.

II. On peut, en second lieu, laisser le cadre dans le méridien et se contenter de mesurer la déviation δ de l'aiguille, si cette aiguille est très-petite et que le cadre ait au moins 2 décimètres de rayon. Lorsque ces conditions seront réalisées, on pourra admettre que les pôles de l'aiguille ne se déplacent pas et restent toujours sensiblement à la même distance des diverses parties du courant, qui exercera sur eux une action constante F perpendiculaire au méridien magnétique (*fig.* 309) : dans ce cas, l'intensité est proportionnelle à la tangente de la déviation δ.

Fig. 309.



En effet, si l'on exprime que les composantes de F et de φ suivant CD sont égales, on a

$$2l\varphi\sin\delta = 2lF\cos\delta,$$
$$M\sin\delta = IMk\cos\delta,$$
$$I = \frac{1}{k}\operatorname{tang}\delta.$$

Les intensités seront proportionnelles aux tangentes de la déviation de l'aiguille, ce qui a fait donner à cet appareil le nom de *boussole des tangentes*.

Il est clair que tout galvanomètre satisfait aux mêmes conditions que cette boussole, tant que les déviations sont assez petites pour qu'on puisse négliger les changements de position de l'aiguille et du cadre, et comme dans ce cas tang δ est proportionnelle à l'arc δ, on peut écrire

$$I = k\delta.$$

Les intensités peuvent alors se mesurer par les déviations de l'aiguille du galvanomètre.

Supposons maintenant qu'on ait placé sur le cadre de cette boussole un fil de résistance λ et qu'on l'introduise dans le circuit extérieur d'un couple hydro-électrique avec d'autres résistances croissantes λ_1, $\lambda_2, \ldots$, on observera successivement des intensités I_1, $I_2, \ldots$,

$$I_1 = \frac{A}{r+\lambda+\lambda_1}, \quad I_2 = \frac{A}{r+\lambda+\lambda_2}, \ldots.$$

Deux de ces équations feront connaître les constantes A et r, et les autres devront vérifier la loi : c'est ce que Pouillet a trouvé en effet.

Piles hydro-électriques. — Considérons une pile formée de n éléments à action constante, dont les forces électromotrices sont A_1, A_2, $A_3, \ldots$, et les résistances propres r_1, r_2, $r_3 \ldots$. Le premier engendre un courant qui parcourt le conducteur extérieur dont la résistance est R, et tous les éléments de la pile qui offrent une somme de résistances $r_1 + r_2 + r_3 + \ldots$. L'intensité sera

$$i_1 = \frac{A_1}{R + r_1 + r_2 + r_3 + \ldots};$$

le courant donné par le deuxième élément traversera le même circuit, et l'on aura

$$i_2 = \frac{A_2}{R + r_1 + r_2 + r_3 + \ldots};$$

il en sera de même de chacun des autres. Tous ces courants se réuniront en un seul égal à leur somme

$$(5) \qquad I = \frac{A_1 + A_2 + \ldots + A_n}{R + r_1 + r_2 + \ldots + r_n} = \frac{\Sigma A}{R + \Sigma r}.$$

Discussion de la formule. — Les piles étant ordinairement composées de couples identiques, on peut supposer égales les forces électromotrices et les résistances de chacun d'eux : la formule (5) devient

$$(6) \qquad I = \frac{nA}{R + nr} = \frac{A}{\frac{R}{n} + r}.$$

Nous verrons bientôt que A est indépendant de l'étendue des couples et ne varie qu'avec la nature et la disposition des liquides et des métaux. r est la résistance d'un couple ou d'un prisme liquide CCZZ (*fig.* 310) dont la conductibilité est c, dont la section et la longueur sont égales à la surface s et à la distance d des deux lames métalliques. Sa longueur réduite est égale à $\frac{d}{cs}$, et, en la remplaçant dans la formule des intensités,

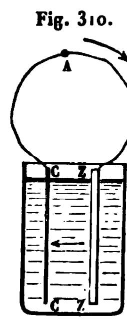


Fig. 310.

$$I = \frac{A}{\frac{R}{n} + \frac{d}{cs}}.$$

Quand R = o, I est égale à sa valeur maxima $\frac{Acs}{d}$, elle est proportionnelle à la surface s des couples, en raison inverse de leur distance d et indépendante du nombre des éléments. Ainsi, dans le cas où la résistance extérieure est faible, il faudra employer un seul couple à surfaces larges et rapprochées. Mais lorsque R sera assez grand pour que $\frac{d}{cs}$ soit négligeable par rapport à $\frac{R}{n}$, l'intensité se réduira à $\frac{nA}{R}$; il n'y aura plus à s'occuper de l'étendue des couples, mais on devra multiplier leur nombre autant qu'on le pourra.

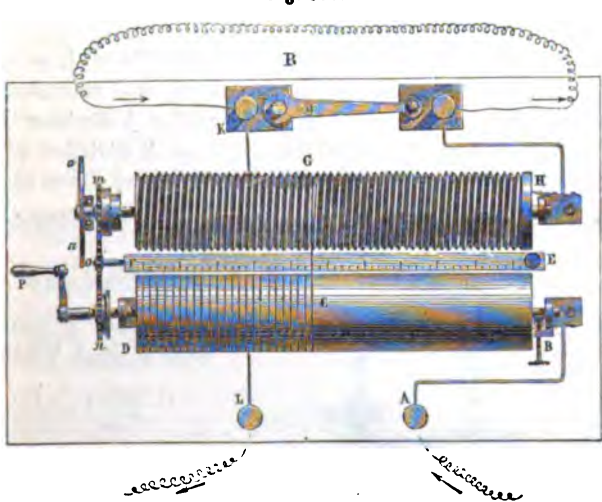
III. — MESURE DES CONDUCTIBILITÉS ÉLECTRIQUES.

Les formules de Ohm exigent que l'on connaisse la conductibilité des substances qu'on emploie et la force électromotrice des éléments de pile. Mesurons d'abord les conductibilités. On y parvient au moyen d'un instrument imaginé par M. Wheatstone, et qu'on nomme *rhéostat* (*fig.* 311).

Rhéostat. — Sur une table de bois sont placés, horizontalement et parallèlement, un cylindre de cuivre C et une vis de bois ou de verre G, dont

le pas est de 1 millimètre. Tous deux ont un diamètre égal et peuvent tourner autour de leur axe dans le même sens et de la même quantité. Le mouvement est donné au cylindre C par une manivelle P et se transmet à la vis D par deux roues d'engrenage égales, *m* et *n*, reliées par un

Fig. 311.



pignon O. Un fil métallique bien homogène et très-fin est enroulé de D en C sur le métal, de G en H dans les sillons de la vis; et le nombre de tours augmente ou diminue sur celle-ci, suivant qu'on fait marcher la manivelle dans un sens ou dans l'autre. Comme, à chaque circonférence que l'on fait, le fil de jonction GC avance de 1 millimètre, le nombre de tours total se mesure par une règle divisée EF, et les fractions de tour sont appréciées par le mouvement d'une aiguille qui parcourt un cercle fixe *aa*.

Supposons maintenant que le courant vienne de A en B, il traversera le cylindre de B en C sans éprouver de résistance sensible; puis il passera de C en G et parcourra toutes les spires du fil qui sont logées dans la rainure de la vis isolante; après quoi il reviendra par HI jusqu'à la poupée I et jusqu'au pôle négatif par IKL. On pourra donc augmenter ou diminuer la longueur du circuit en augmentant ou en diminuant le nombre des spires sur la vis. Si ce nombre est n et si le rayon de la vis est r, $2\pi rn$ sera la longueur du fil et $\frac{2\pi rn}{cs}$ sa résistance.

Pour employer cet appareil à la mesure des conductibilités, on a placé

sur la même table une seconde poupée K vis-à-vis de la première I ; toutes deux peuvent être réunies ou séparées par un bras métallique M assez gros pour n'avoir pas de résistance sensible. Supposons qu'elles soient d'abord réunies : le courant passera par le rhéostat, reviendra par IMKL jusqu'au boulon L et jusqu'à la pile par l'intermédiaire d'un galvanomètre dont on notera la déviation. Si nous séparons ensuite les poupées I et K en écartant le bras M, la communication sera interrompue ; mais on la rétablit par le fil IRK dont on veut trouver la conductibilité ; il est traversé par le courant, qu'il affaiblit, parce qu'il oppose une résistance déterminée, et l'on fait tourner le rhéostat de manière à diminuer de n le nombre de tours enroulés sur GH, jusqu'à ce que la déviation soit redevenue la même qu'avant l'introduction du fil d'épreuve. D'une part, on a introduit la résistance $\frac{l'}{c's'}$ du fil à essayer ; de l'autre, on a supprimé celle du fil déroulé qui est $\frac{2\pi rn}{cs}$, et, puisque le courant est resté le même, il faut que

$$\frac{2\pi rn}{cs} = \frac{l'}{c's'}.$$

Fig. 312.

On peut ainsi comparer les conductibilités de tous les corps à celle d'un métal pris comme terme de comparaison. Le mercure est le plus convenable.

Quand il s'agit de liquides, on emploie une autre sorte de rhéostat (*fig.* 312), qui se compose essentiellement d'un tube de cristal rodé de rayon r et de section $s = \pi r^2$. Il est plongé dans une éprouvette MN pleine du liquide qu'on veut étudier, et on introduit dans l'intérieur une tige cd qui s'enfonce plus ou moins par le jeu d'une crémaillère divisée BB'. On fait arriver le courant par cette tige ; il traverse, de d en E, une longueur de liquide qu'on fait varier à volonté, et il sort par une plaque métallique E. Voici un tableau des résultats :

Conductibilité électrique des solides.

Argent recuit	55,5	Potassium	11,6
Argent écroui	51,9	Lithium	10,5
Cuivre	50,1	Palladium	7,8
Or	36,0	Étain	7,6
Sodium	20,8	Fer	6,7
Magnésium	14,2	Plomb	4,6
Cadmium	13,6	Platine	4,5
Zinc	13,4	Strontium	3,7
Calcium	12,3	Mercure	1,00

Conductibilité des liquides.

Acide azotique à 36 degrés	0,000 052 1
Chlorure de sodium saturé à 9°,5	0,000 017 5
250 eau, 30 iodure de potassium	0,000 006 2
Azotate de cuivre saturé	0,000 005 0
Sulfate de zinc saturé	0,000 003 2
Sulfate de cuivre saturé	0,000 003 0
Eau distillée	0,000 000 007

IV. — MESURE DES FORCES ÉLECTROMOTRICES.

On a employé beaucoup de méthodes pour mesurer la force électromotrice.

1° Voici celle de Fechner. On fait passer le courant à travers une bobine dont la résistance totale R est tellement grande qu'on peut négliger celle des couples qu'on veut comparer. Soient i, i', i'', ... les intensités du courant donné par ces couples, et A, A', A'',... les forces électromotrices de ces couples, on aura

$$i = \frac{A}{R}, \quad i' = \frac{A'}{R}, \quad i'' = \frac{A''}{R}, \ldots.$$

Les rapports de ces forces électromotrices sont mesurés par les rapports des intensités observées.

2° M. Wheatstone fait passer le courant de chaque couple à travers le rhéostat et un galvanomètre, et il fait varier la résistance de R à R + l, de manière à obtenir deux intensités déterminées i et i'. On a, dans ces deux cas, pour un même couple,

$$i = \frac{A}{R}, \quad i' = \frac{A}{R+l},$$

d'où, en éliminant R,

$$A = l \frac{ii'}{i - i'}.$$

Avec un autre couple, on aura de la même manière

$$A' = l' \frac{ii'}{i - i'}.$$

Par conséquent

$$\frac{A}{A'} = \frac{l}{l'}.$$

3° Enfin, M. J. Regnault a remarqué que, si l'on réunit en sens contraire deux piles de n et de n' éléments, dont les forces électromotrices sont nA et $n'A'$, et les résistances R et R', on a pour exprimer l'intensité i du courant différentiel

$$i = \frac{nA - n'A'}{R + R'}.$$

Cette intensité s'annule quand $nA = n'A'$. Cela étant, M. Regnault prépare une pile de 60 couples thermo-électriques identiques de cuivre et de bismuth, dont les soudures opposées sont à zéro et à 100 degrés, et dont la force électromotrice A est prise pour unité. On peut introduire dans le circuit un nombre n de ces éléments et les opposer au couple qu'il s'agit d'étudier. La force électromotrice A' de ce couple est égale à nA ou à celle du nombre n d'éléments thermo-électriques suffisant pour annuler le courant. On a trouvé ainsi qu'un élément composé comme il suit :

Zinc, sulfate de zinc | Sulfate de cadmium, cadmium

équivaut à 55 unités. En le comparant à son tour à d'autres couples plus énergiques, on peut exprimer ceux-ci par un certain nombre de couples zinc et cadmium, augmenté d'un nombre n d'éléments thermo-électriques.

Résultats. — Les mesures exécutées par ces diverses méthodes ont conduit aux résultats suivants :

1° La force électromotrice change avec la nature des liquides, mais ne dépend pas de leur degré de concentration.

2° Elle change avec les métaux qui entrent dans la composition du couple. Elle est généralement très-grande quand l'un d'eux est du zinc; elle augmente si l'on amalgame ce métal, mais elle ne varie pas avec la quantité de mercure. Il en est de même avec les amalgames de potassium ou de sodium.

3° La nature, l'épaisseur et le degré de porosité du diaphragme influent sur la conductibilité du couple, mais nullement sur la force électromotrice.

4° Cette force est indépendante de l'étendue des surfaces.

Il résulte de ces lois qu'une force électromotrice est déterminée quand on connaît seulement la nature des liquides et des métaux, et on peut la mesurer une fois pour toutes. Voici les valeurs qu'elle atteint dans les divers couples usuels, en prenant comme unité le couple thermo-électrique :

COMPOSITION DES COUPLES.				DÉSIGNATION des couples.	FORCE électromotrice.
Couple thermo-électrique				... .	1
Zinc pur........	SO^4Zn	SO^4Ca.	Cadmium.	Zinc-cadmium.	55
Zinc pur........	SO^3HO........		Cuivre....	Wollaston....	99
Zinc amalgamé..	SO^4Cu.... ...		Cuivre...	Wheatstone...	153
Zinc pur........	SO^4Zn	SO^4Cu.	Cuivre....	Daniell.......	175
Zinc amalgamé..	SO^3HO	SO^4Cu.	Cuivre....	Daniell.......	183
Zinc amalgamé..	SO^3HO	AzO^5...	Platine...	Grove........	318
Zinc amalgamé..	SO^3HO	AzO^5...	Charbon..	Bunsen.... ..	319
Potassium amalg.	Ch Na	AzO^5...	Platine...	... .	416

Nous savons que, dans un voltamètre, le dégagement du gaz oppose une résistance au passage du courant, c'est-à-dire qu'il développe une force électromotrice inverse de celle de la pile. Elle a été mesurée par M. Ed. Becquerel. Voici ses résultats :

Couples zinc amalgamé et	Forces électromotrices de polarisation par l'hydrogène.
Or..............................	48,88
Platine..............	43,38
Argent	39,75
Mercure.........................	39,75
Cuivre..........................	27,50
Zinc amalgamé...............	2,00
Zinc pur........................	1,75

Au contact de deux liquides, il y a aussi une force électromotrice; elle est généralement très-faible, comme le montre le tableau suivant donné par le même physicien :

Action de deux dissolutions.

Solution négative.	Solution positive.	Forces électromotrices.
Sulfate de cuivre saturé.....	Eau acidulée par SO^3 au 10e.	5,50
Eau acidulée par SO^3 au 10e.	Acide azotique pur.........	19,25 à 21
Eau acidulee par SO^3 au 10e.	Acide chromique...........	27,80
Acide chlorhydrique	Acide azotique pur.........	52,50
Potasse...................	Acide azotique pur.........	55,50

Enfin, M. Ed. Becquerel a mesuré avec la même unité la force électromotrice de couples formés par le platine d'une part, et de l'autre par un des métaux qui suivent, plongés dans un grand nombre de liquides différents. Voici les résultats de ces mesures :

	EAU DISTILLÉE	EAU CHLORÉE.	EAU, 500. SO^3HO, 1	EAU, 9. SO^3HO, 1	EAU, 10. HCl, 1.	EAU, 4. KO, 1.
Amalg. de potassium.	"	165,50	"	137,32	"	"
Zinc amalgamé......	"	"	81,50	81,75	82,75	81,00
Zinc pur............	31,50	108,75	78,25	79,25	81,00	78,00
Cadmium...........	"	96,00	61,00	62,75	66,75	55,00
Plomb..............	21,00	81,50	52,75	52,75	53,25	50,00
Étain...............	"	82,00	52,25	52,25	53,75	67,25
Fer.................	17,50	83,00	50,75	48,75	49,75	50,0?
Aluminium..........	"	"	45,00	40,75	66,75	85,00
Nickel..............	"	"	34,00	35,75	38,75	24,0?
Cobalt..............	"	"	35,00	34,75	37,75	31,0?
Bismuth............	"	50,00	26,00	29,50	33,00	36,00
Antimoine..........	"	53,00	26,00	27,75	28,75	48,25
Cuivre..............	10,00	61,00	26,00	27,75	36,75	33,00
Argent..............	"	55,25	9,50	17,25	27,25	0
Mercure............	"	"	"	25,00	"	"
Or..................	"	10,00	"	0	"	0
Platine.............	0	0	0	0	0	10,0?

On peut admettre en général que, dans un couple, la force électromotrice effective est égale à celle qui se développe au contact du métal négatif (zinc) et du liquide où il plonge, diminuée de celle qui se produit au contact du métal positif avec son liquide, diminuée encore des forces de polarisation, et enfin augmentée ou diminuée de l'action des liquides entre eux. Convenons, par exemple, de représenter par Zn, SO^3 et Cu, SO^3 les forces électromotrices du zinc et du cuivre dans l'acide sulfurique, par Cu, H la force de polarisation de l'hydrogène au contact du cuivre, on pourra représenter la force électromotrice A du couple de Wollaston par la formule

$$\begin{aligned} A &= \text{Zn, SO}^3 - \text{CuSO}^3 - \text{Cu, H} \\ &= (\text{Zn, SO}^3 - \text{Pt, SO}^3) - (\text{Cu, SO}^3 - \text{Pt, SO}^3) - \text{Cu, H}, \end{aligned}$$

et en remplaçant ces divers termes par leurs valeurs tirées des tableaux précédents, on trouve

$$A = 81,75 - 27,75 = 54,00$$

pour la force initiale du couple de Wollaston, et

$$A = 54,00 - 27,50 = 26,50$$

quand la polarisation, qui est exprimée par le terme Cu, H, s'est établie. Pour un couple de Grove, on aurait

$$A = Zn,\ SO^3 + SO^3,\ AzO^5 - Pt,\ AzO^5$$
$$= (Zn,\ SO^3 - Pt,\ SO^3) + Pt,\ SO^3 + SO^3,\ AzO^5 - Pt,\ AzO^5$$
$$= 99.$$

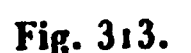
Un calcul analogue donnerait la force électromotrice d'un élément quelconque.

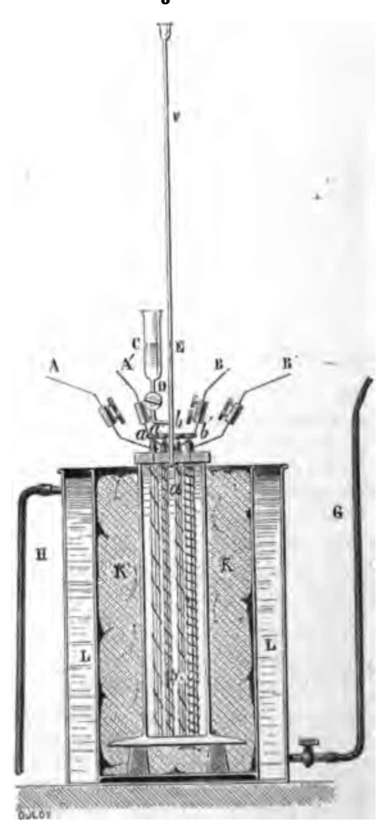
CHAPITRE IV.

LOI DE JOULE.

I — MESURE DE LA CHALEUR DÉGAGÉE DANS LES CONDUCTEURS.

On doit à M. Joule les premières mesures de la chaleur développée dans les conducteurs que traverse un courant. Il faisait passer le courant, d'abord à travers une boussole des tangentes, qui mesurait son intensité, ensuite dans une spirale dont la résistance r était connue, et qui plongeait dans un calorimètre à eau; la température qu'elle communiquait à cette eau permettait de calculer la chaleur w développée dans la spirale pendant l'unité de temps. Cette chaleur fut trouvée proportionnelle au carré de l'intensité du courant et à la résistance du fil :


Fig. 313.



$$w = Kri^2.$$

Cette loi est fondamentale. On peut la vérifier aisément au moyen d'un instrument que j'ai nommé *thermoréomètre* (*fig.* 313). C'est un thermomètre dont le réservoir $\alpha\beta$ est une éprouvette fermée, remplie de benzine, ou d'essence de térébenthine, ou d'un liquide isolant quelconque. La tige est un tube très-fin EF communiquant avec un tube de niveau C par un robinet D. On peut à tout moment ouvrir ce robinet, ramener le sommet de la colonne en E, puis

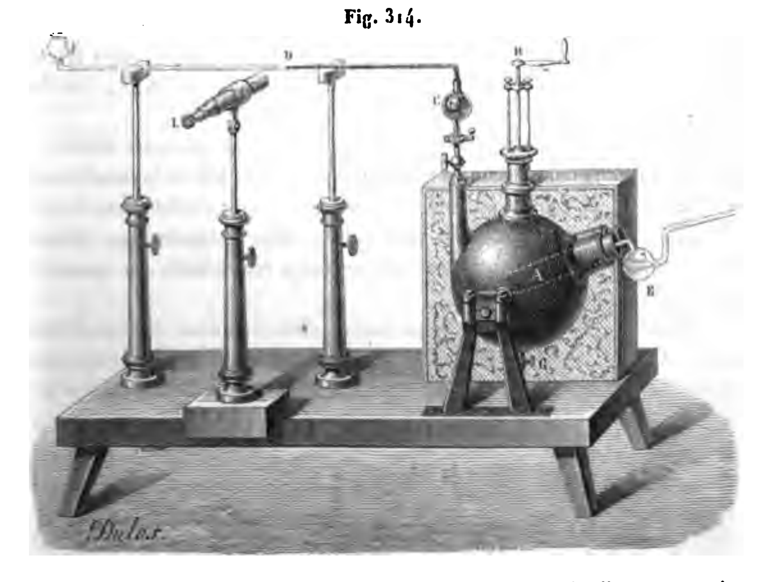
refermer la communication au moment de faire l'expérience. Dans le réservoir sont disposés quatre fils en spirale, dont les résistances sont 1, 2, 4, 8; ils aboutissent à des bornes *a*, *a'*, *b*, *b'*,.... On peut faire passer le courant dans un ou dans plusieurs de ces fils, c'est-à-dire dans des résistances très-variables.

Aussitôt que le courant passe, la colonne de liquide s'élève d'une quantité proportionnelle à la chaleur développée par le courant : comme l'instrument est d'une sensibilité extrême, les moindres courants agissent, et la loi se vérifie avec la dernière précision.

M. Edm. Becquerel a montré que la loi de Joule s'applique aux conducteurs liquides comme aux solides; ainsi elle est vérifiée par une dissolution de sulfate de cuivre, décomposée avec des électrodes de cuivre, parce que, si la dissolution du cuivre au pôle positif absorbe de la chaleur, le dépôt du même métal à l'extrémité négative en produit une quantité égale, et tout se réduit au passage du courant. Il n'en est plus de même dans le voltamètre à eau : la chaleur y est diminuée de celle que les gaz absorbent en se dégageant. Elle est en général diminuée de la chaleur qu'exige l'électrolysation.

La loi s'applique encore aux éléments des piles eux-mêmes, ainsi que M. Favre l'a montré par son calorimètre (*fig.* 314).

Fig. 314.



Il dispose en A deux moufles voisins, destinés à recevoir, l'un une petite

pile de Smée, l'autre une résistance r, et, suivant qu'il place à la fois ou séparément cette pile et cette résistance dans les moufles, il mesure ou la somme des chaleurs, ou chacune d'elles séparément.

Désignons par r la résistance extérieure, par r_1 celle de la pile et par $R = r + r_1$ la résistance totale. Les chaleurs développées pendant un temps t seront :

1° Dans le conducteur........... $wt = Kri^2t$;

2° Dans la pile.................. $w_1t = Kr_1i^2t$;

3° Dans le circuit total........... $Wt = KRi^2t$.

Mais it exprime la quantité d'électricité qui circule pendant le temps t, désignons-la par e. D'un autre côté, $i = \frac{A}{R}$, et, en remplaçant :

$$1° \quad wt = K\frac{r}{R}Ae;$$

$$2° \quad w_1t = K\frac{r_1}{R}Ae;$$

$$3° \quad Wt = KAe.$$

La troisième formule montre que la chaleur totale dégagée dans la pile et le circuit est proportionnelle à e. Si e est égale à l'unité, c'est la chaleur que produit la solution de 1 équivalent de zinc, ou 18444 calories. L'expérience a montré qu'il en est réellement ainsi.

Mais la première et la deuxième formule montrent que cette chaleur se partage proportionnellement à la résistance entre la pile et le conducteur : de sorte que, si celui-ci est nul, la chaleur est tout entière dans la pile, et que, s'il est infini, elle est tout entière dans le conducteur. L'expérience vérifie cette conséquence avec quelques restrictions que nous n'étudierons pas.

Considérons deux couples quelconques dont les forces électromotrices soient A et A', appelons Wt et $W't'$ les quantités totales de chaleur produites par ces couples quand ils ont dégagé une unité d'électricité, c'est-à-dire quand 1 équivalent de zinc a été dissous dans chacun d'eux et que $e = 1$,

$$Wt = KA, \quad W't' = KA',$$

$$\frac{Wt}{W't'} = \frac{A}{A'}.$$

Donc les forces électromotrices sont proportionnelles aux quantités de

chaleur dégagées par la dissolution de 1 équivalent de zinc dans les deux couples.

Par exemple, la dissolution du zinc dans l'acide sulfurique développe 53 000 calories, mais le dégagement de l'hydrogène en emporte 34 000 : reste 19 000. C'est le cas du couple de Wollaston, sa force électromotrice est 19 000.

Dans le couple de Daniel, le zinc, en se dissolvant, dégage encore 53 000 calories ; le cuivre, en se déposant, en absorbe 30 000 : ce qui reste disponible est 23 000 : 23 000 mesure la force électromotrice ; elle est plus grande que pour le couple de Wollaston.

Enfin, dans le couple de Grove, l'hydrogène ne se dégage pas, il réduit l'acide azotique à l'état d'acide azoteux, ce qui absorbe peu de chaleur et laisse disponible l'énorme quantité de 46 000 calories. Cet élément vaut donc plus de deux couples Wollaston.

II. — TEMPÉRATURE DU CIRCUIT.

Température du circuit. — Si l'on considère une portion quelconque du circuit dont la résistance soit r, elle recevra pendant l'unité de temps une quantité de chaleur égale à w ; sa température s'élèvera de θ, et θ deviendra constant quand la chaleur perdue par rayonnement sera égale à w. Or cette chaleur perdue sera proportionnelle : 1° à la surface extérieure du fil de diamètre d et de longueur l, ou à $\pi d l$; 2° à son excès de température θ si l'on admet la loi de Newton ; 3° à un coefficient α qui représente le pouvoir émissif et qui ne variera que fort peu pour les diverses valeurs que peut prendre θ. On aura donc

$$w = \mathrm{K} r i^2 = \pi d l \alpha \theta,$$

et en remplaçant r par $\frac{4l}{\pi d^2 c}$, i par $\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{R}}$, $\frac{4\mathrm{K}}{\pi^2}$ par M,

$$\mathrm{K}\frac{4l}{\pi d^2 c}\frac{\mathrm{A}^2}{\mathrm{R}^2} = \pi d l \alpha \theta, \quad \theta = \mathrm{M}\frac{1}{\alpha}\frac{1}{d^3}\frac{1}{c}\frac{\mathrm{A}^2}{\mathrm{R}^2}.$$

On tire de cette formule les conséquences suivantes :

1° Si le circuit extérieur est formé par une chaîne de fils de mêmes diamètres et de conductibilités différentes, de platine et d'argent par exemple, les valeurs de θ correspondant à chaque fil seront en raison inverse de sa conductibilité c ; les mailles de platine s'échaufferont plus que celles de l'argent, les premières pourront rougir et les dernières rester obscures. C'est une expérience qui a été faite par Children.

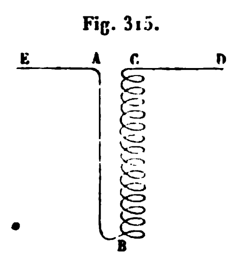
2° θ est en raison inverse de d^3 ; conséquemment, dans une chaîne composée de fils de platine alternativement gros et fins, les fins rougiront et les gros resteront obscurs.

3° θ est en raison inverse du carré de la résistance totale R ; et par là θ dépend de la pile que l'on emploie. Si l'on augmente la dimension des couples sans changer leur nombre, la résistance R diminuera sans que la force électromotrice A change, et les effets calorifiques seront plus intenses. C'est ce qui a été constaté par tous les observateurs.

4° Enfin puisque θ est inversement proportionnel au pouvoir émissif α, toutes les circonstances qui favorisent le refroidissement diminuent la température du fil : cela explique une expérience curieuse de M. Grove. Après avoir fait rougir dans l'air un fil de platine, avec le courant d'une pile, il le plongea dans de l'hydrogène, et il le vit devenir obscur : c'est qu'en effet l'hydrogène est de tous les gaz celui dont le pouvoir refroidissant est le plus grand.

5° Les phénomènes ne sont cependant pas aussi simples que nous venons de le dire. La conductibilité des métaux diminue quand leur température augmente. Conséquemment, le premier effet du courant est d'échauffer le fil ; mais la réaction de cet échauffement fait diminuer c et augmenter la résistance R. Ceci explique une expérience de Davy. Il faisait passer à travers le fil de platine EABCD (*fig.* 315) un courant assez intense pour l'échauffer jusqu'au rouge sombre. Il plongeait ensuite la partie ABC dans de la glace, et il voyait AE et CD se réchauffer jusqu'au rouge blanc, parce que le refroidissement de ABC diminuait la résistance totale. L'inverse a lieu, et CD et AE se refroidissent, si l'on échauffe la spirale avec une lampe à alcool.

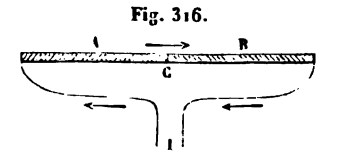
Fig. 315.



Températures aux soudures d'un circuit. — Outre les échauffements que le passage d'un courant détermine dans toute l'étendue d'un conducteur homogène, il y a des variations de température secondaires aux points de suture des conducteurs différents, quand ils sont placés à la suite les uns des autres. Ces phénomènes ont été découverts par Peltier.

On sait qu'en échauffant la soudure C d'une règle composée d'antimoine A et de bismuth B (*fig.* 316) on obtient un courant dans le sens contraire aux flèches. Or Peltier a découvert qu'en faisant passer un courant inverse du précédent et dirigé suivant les flèches, on réchauffe la soudure C. Inversement, en refroidissant la soudure C, on détermine un courant dans le sens des flèches, et en faisant passer un courant opposé, cette soudure se refroidit, pourvu toutefois que le courant soit faible.

Fig. 316.

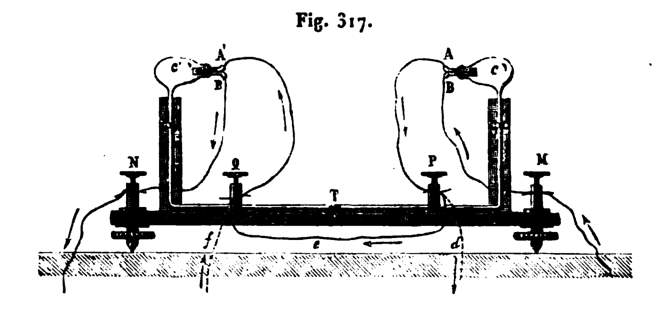


En général, quels que soient les deux métaux A et B, les variations de température d'une soudure C produisent un courant *direct*, et elles sont reproduites par un courant *inverse ;* elles sont causes du courant direct dans le premier cas et effets du courant inverse dans le second. Cette loi est due à M. Frankenheim.

Pour démontrer ces actions particulières, Peltier employa un thermomètre de Leslie (*fig.* 317) ; il introduisait dans les deux boules c, c' deux couples de

bismuth et d'antimoine BA, A'B' disposés inversement dans un circuit à travers lequel il faisait passer un courant de M en N. Ce courant allait du bismuth B

Fig. 317.



à l'antimoine A dans la première boule *c* qu'il refroidissait, et de l'antimoine A' au bismuth B' dans la seconde *c'* qu'il échauffait. Les deux actions s'ajoutaient pour faire marcher l'index I. On peut diriger le courant dans un seul des deux couples : si c'est le second A'B', il s'échauffe toujours; si c'est le premier AB, il se refroidit quand le courant est très-faible et finit par s'échauffer, mais toujours moins que A'B' quand le courant qui le traverse prend une intensité progressivement croissante.

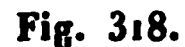
III. — L'ARC ÉLECTRIQUE.

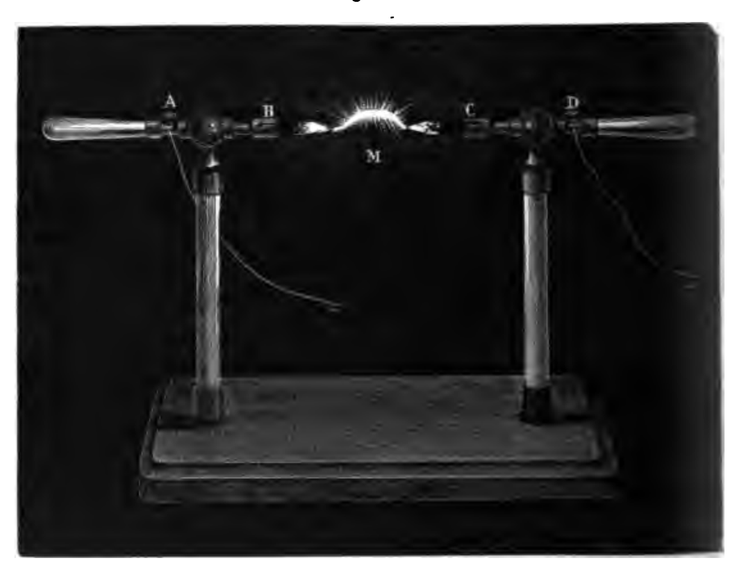
Arc voltaïque. — Ayant disposé une pile de 2000 éléments qui avait une surface totale de 824000 centimètres carrés, Davy fit communiquer les deux pôles avec deux tiges horizontales de charbon de 3 centimètres de longueur et de 4 millimètres de diamètre, séparées par une distance de $0^{mm},5$. Il vit alors une lumière éblouissante et continue jaillir sans bruit au point de séparation et se continuer indéfiniment (*fig.* 318). Il écarta progressivement les charbons l'un de l'autre jusqu'à 10 à 11 centimètres, et la même lumière s'allongea dans l'intervalle en prenant la forme d'un axe convexe vers le haut, conservant un éclat comparable à celui du soleil et développant une chaleur intense qui faisait rougir les charbons jusqu'au milieu de leur longueur.

L'arc voltaïque ne commence à se produire que si les charbons sont amenés presque au contact; mais une fois qu'il est allumé, on peut les écarter jusqu'à une distance maximum après laquelle il s'éteint.

La chaleur de l'arc est une des plus intenses que l'on puisse produire : le platine y fond comme la cire dans une bougie. Despretz a montré que les corps les plus réfractaires peuvent s'y liquéfier et même s'y vola-

tiliser; que les cônes de charbon se ramollissent, se courbent, se soudent et se réduisent en vapeur, et qu'après l'action ils sont devenus mous et traçants. D'après M. Jacquelain, le diamant se comporte comme tous les charbons, il perd sa transparence et ses propriétés précieuses pour passer à l'état de graphite.


Fig. 318.



Les deux pôles ne prennent pas la même température : le positif s'échauffe plus que le négatif. Il suffit pour le démontrer de placer, comme le fit M. Gassiot, deux rhéophores de cuivre en croix : le positif rougit et le négatif reste obscur; ou bien, comme M. Tyrtow, de faire arriver le courant sur un bain de mercure par une pointe métallique : elle rougit, mais elle reste sombre, et c'est le mercure qui se volatilise quand on change la direction du courant. Enfin si les deux rhéophores, au lieu d'être identiques, sont formés de deux substances inégalement conductrices, c'est celle qui l'est le plus qui s'échauffe en général le moins, d'après Matteucci.

MM. Fizeau et Foucault ont comparé la puissance photographique de l'arc et du soleil. Ils ont trouvé que, toutes choses égales d'ailleurs, l'écart photochimique de l'arc est les $\frac{2}{5}$ de celui du soleil, en employant trois séries réunies de 46 couples de Bunsen, fonctionnant depuis une heure.

Phénomènes de transport. — Quand l'arc se produit dans l'air, les deux tiges de charbon diminuent de volume, parce qu'elles brûlent toutes deux; mais, dans le vide, cette combustion ne se fait pas, et l'on voit la pointe positive se creuser et diminuer de poids pendant que la négative augmente de volume et s'allonge : il y a donc un transport de matière du pôle positif vers le pôle négatif.

M. van Breda, ayant établi l'arc entre deux métaux différents, a vu que tous les deux sont entraînés à la fois, le positif dans la direction du courant, le négatif dans le sens opposé et quelquefois en quantité égale. Matteucci a confirmé l'exactitude de ces faits, bien que l'entraînement lui ait toujours paru plus abondant dans le sens du courant, ce qu'il attribue avec raison à la plus haute température du pôle positif. Il y a donc en général un double transport des substances à travers l'arc; cela doit avoir lieu même quand les rhéophores sont identiques, et dans ce cas, l'expérience n'accuse que la différence entre les quantités de matières entraînées dans les deux sens. Ces conclusions seront confirmées par l'étude du spectre électrique.

D'après ces résultats, voici comment nous pouvons concevoir la formation de l'arc. Les pointes étant d'abord très-rapprochées, le courant franchit leur intervalle en entraînant des molécules matérielles qui constituent une chaîne conductrice. Suivant la loi de Joule, cette chaîne s'échauffe jusqu'à émettre une vive lumière. Une fois qu'elle est constituée, elle augmente la conductibilité de l'intervalle des pointes, que l'on peut alors écarter progressivement sans que le courant cesse de circuler. Mais si l'on dépasse une certaine distance, le transport s'arrête et tout s'éteint. Pour rétablir le courant, il faut rétablir la chaîne des particules, soit en approchant les pointes, soit en faisant jaillir entre elles l'étincelle d'une machine électrique.

Une fois commencé, l'arc électrique serait donc un conducteur; il aurait une résistance déterminée r, et, par conséquent, il s'y développerait suivant la loi de Joule une quantité de chaleur égale à KrI^2. J'ai vérifié qu'il en est ainsi : 1° en plaçant l'arc dans l'intérieur d'un calorimètre à eau et mesurant la chaleur qu'il développe en une minute; 2° en le remplaçant par une résistance métallique qui réduisait le courant à la même intensité I, et en constatant qu'il s'y développait autant de chaleur.

La seule particularité digne d'attention, c'est que toute cette chaleur naît dans un espace très-petit, et qu'elle y développe une énorme température, par suite une lumière intense.

CHAPITRE V.

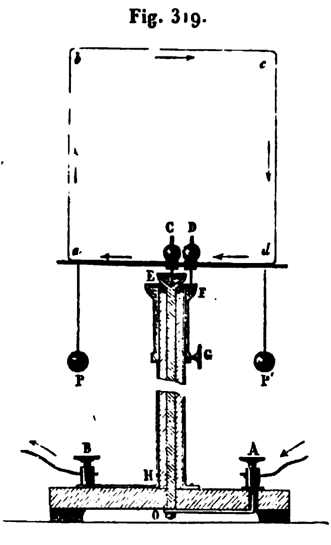
LOIS D'AMPÈRE.

I. — ACTIONS RÉCIPROQUES DES COURANTS.

Toutes les fois que deux conducteurs traversés par des courants sont voisins, ils exercent l'un sur l'autre des attractions ou des répulsions. Ces effets ont été découverts par Ampère et constituent une des plus belles branches de la physique. Pour les constater, il faut tout d'abord construire un appareil qui permette de faire passer les courants dans des fils mobiles de forme quelconque.

Sur une base de bois (*fig.* 319) sont fixées deux poupées A et B. La première reçoit le courant et l'amène par une colonne métallique OE dans un godet de fer E, qui contient du mercure. Tout autour de cette colonne, et séparée d'elle par un tube de verre, est une enveloppe métallique HF, qui est en communication avec la poupée B et qui se termine au sommet F par une coupe annulaire de fer pleine de mercure. On peut considérer E comme le pôle positif et F comme le pôle négatif de la pile, et on les réunit par le conducteur *abcd* dans lequel on veut faire passer le courant. Ce conducteur est suspendu par une aiguille C dans le godet positif E et se termine par une deuxième aiguille D, qui plonge dans le mercure de F, mais sans toucher le fond de la coupe. Tout le système est mobile autour de l'axe vertical passant par C.

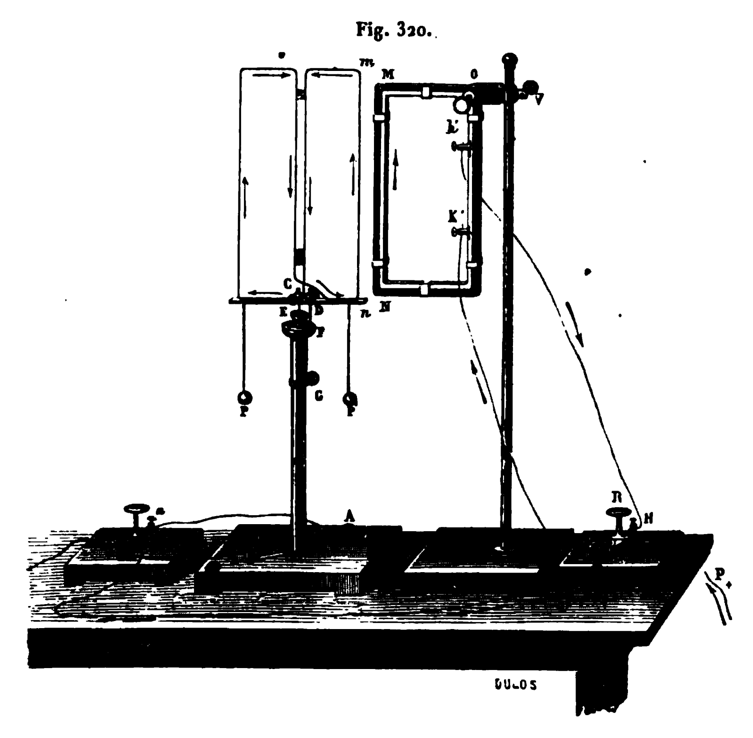
Fig. 319.



On fait agir sur ces courants mobiles des courants fixes dont la forme est variable, suivant les expériences que l'on a en vue; le plus souvent

(*fig.* 320) ils sont constitués par un fil de cuivre terminé aux poupées *h'* et *k'* et faisant plusieurs tours sur un rectangle OMN*k'h'*. Ce cadre est soutenu, à une hauteur qu'on fait varier à volonté, sur une colonne autour

Fig. 320.



de laquelle il peut tourner pour se placer dans tous les azimuts possibles. Ses côtés MN et MO peuvent être dirigés verticalement ou horizontalement par le jeu d'une articulation O.

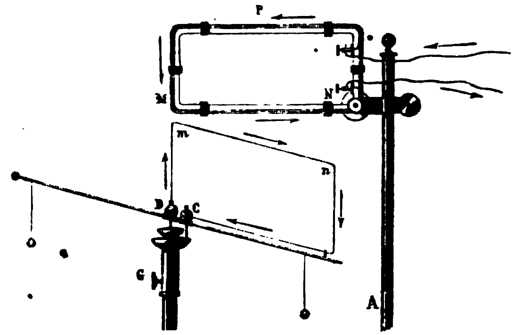
Nous allons maintenant constater l'existence des actions réciproques exercées par deux courants voisins, et déterminer leur sens.

I. **Courants parallèles.** — L'expérience étant disposée comme dans la *fig.* 320, on trouve que les parties MN et *mn* se rapprochent ou s'éloignent si le courant les traverse dans la même direction ou dans deux directions contraires. Or ces parties, étant plus voisines que toutes les autres, doivent exercer une action prépondérante qui détermine le sens du mouvement. Par conséquent *deux courants parallèles s'attirent ou se repoussent s'ils vont dans le même sens ou dans des sens contraires.*

II. Courants angulaires. — On met en présence deux portions de courant horizontales MN et *mn* (*fig.* 321), faisant un angle quelconque entre

Fig. 321.





elles. L'expérience prouve que MN *et mn s'attirent si tous deux vont en s'éloignant ou en se rapprochant du sommet de l'angle qu'ils forment, et se repoussent si l'un s'éloigne et que l'autre s'approche de ce même sommet.*

L'action ne changera pas de sens si l'on élève le courant MNP en le laissant parallèle à sa première position et de manière que D*m*M soit la perpendiculaire commune à MN et à *mn*. On en conclut que *deux courants quelconques agissent comme si leur perpendiculaire commune était le sommet de leur angle.*

Il résulte de là que si un courant horizontal XY agit sur une portion du courant vertical CO′ (*fig.* 322), et que OO′ soit la perpendiculaire commune, les deux éléments *m*, *m′* situés à égale distance de O attireront et repousseront également CO′, qui alors sera sollicité par une force NR parallèle à XY.

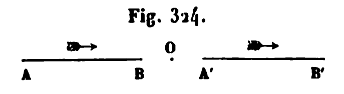
Fig. 322.

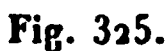
Fig. 323.

Enfin, si le courant XY agissait sur un courant croisé CB (*fig.* 323), il y aurait attraction dans les angles COX et BOY, et répulsion dans les angles adjacents; CB tournerait autour du point O et viendrait se placer contre XY et dans le même sens.

III. Portions d'un même courant rectiligne. — Deux portions AB, A'B' d'un même courant (*fig.* 324) peuvent être considérées comme faisant un angle de 180 degrés dont le sommet est en O, l'une se rapprochant, l'autre s'éloignant de O. Dès lors elles doivent se repousser. Pour le démontrer, Ampère prit une auge de bois (*fig.* 325), remplie de mercure et divisée par une lame de verre en deux compartiments qui communiquaient par les deux pôles d'une pile par les poupées P et Q. Un petit

Fig. 324.



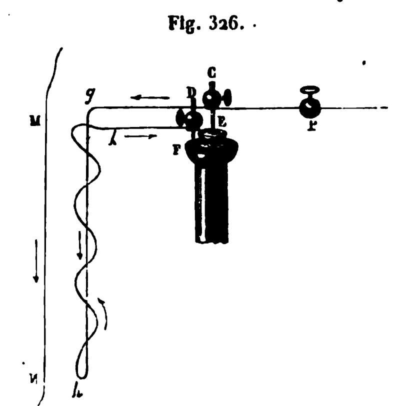

Fig. 325.



conducteur de cuivre BEC, verni dans toute sa longueur, à l'exception de ses extrémités B et C, nage sur le mercure des deux compartiments, qu'il réunit par un arc E passant en forme de pont par-dessus la cloison; le courant suit la route ABECD. L'expérience démontre que les deux portions fixes AB et CD de ce courant repoussent et font reculer le conducteur mobile qui les prolonge.

IV. Courants sinueux. — Plaçons sur le support des courants mobiles (*fig.* 326) le conducteur C*ghk*D qui offre une branche descendante rectiligne *gh* et une partie remontante *hk* qui est sinueuse et dont la figure est absolument quelconque, mais qui s'éloigne très-peu de *gh*. Si l'on oppose à ce système un courant fixe MN, il n'y a aucune action, ce qui prouve que le courant sinueux inverse *hk* détruit l'effet du courant rectiligne direct *gh*, et par conséquent que *l'on pourra toujours remplacer un courant rectiligne par un courant sinueux quelconque de même sens, pourvu qu'il s'écarte très-peu du premier.*

Fig. 326.



V. Effet d'un changement de sens. — Toutes les expériences montrent que si l'on change le sens de l'un des deux courants, on ne fait rien que changer le signe de l'action qu'ils exercent entre eux.

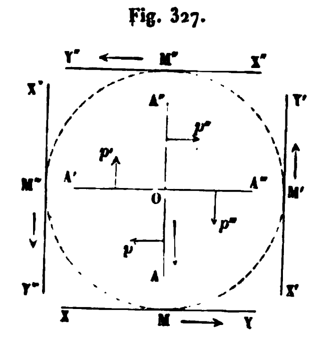
II. — LE COURANT TERRESTRE.

La terre est enveloppée d'un courant qui va de l'est à l'ouest et qui joue un rôle capital dans les phénomènes magnétiques. Pour en démontrer l'existence, il faut commencer par étudier les propriétés d'un courant indéfini.

Propriétés d'un courant indéfini. — En partant des lois d'Ampère, nous allons chercher l'effet qu'un courant indéfini horizontal exercerait sur divers systèmes de courants placés dans son voisinage.

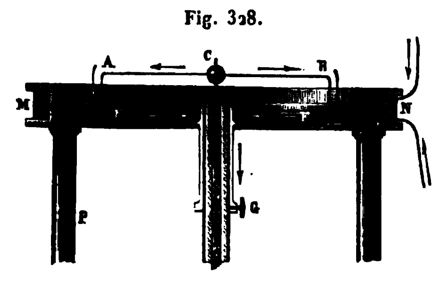
1° Le courant indéfini XY imprimera un mouvement de rotation continu à un courant $\underrightarrow{OA}$ horizontal et mobile autour d'un axe vertical O (*fig.* 327). En effet, ce courant est d'abord placé en OA et sollicité par la force normale p qui l'amène en OA'. Dans cette direction, il sera parallèle à XY et marchera en sens contraire; il sera donc repoussé par la force p' en OA''. Là, il éprouvera une action p'', et quand il sera en OA''', il sera attiré par p'''. On voit donc que la force agit toujours dans le sens nécessaire pour continuer la rotation.

Fig. 327.



Le même effet serait produit si le courant XY prenait les positions X'Y', X''Y'', X'''Y''', ou bien s'il était remplacé par le cercle MM'M''M'''. C'est en effet avec un courant circulaire que l'on fait l'expérience (*fig.* 328).

Fig. 328.

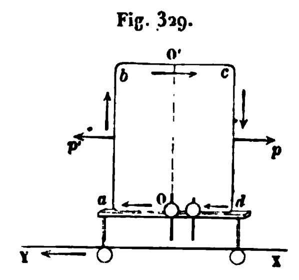


Le support du courant mobile ne diffère de celui de la *fig.* 319 que par la cuvette extérieure, qui est remplacée par une large coupe de fer EF remplie de mercure. L'équipage mobile est

composé de deux fils horizontaux CA, CB, recourbés verticalement en AE et BF, et que le courant traverse en s'éloignant ou en se rapprochant de C. Enfin le conducteur fixe est un fil de cuivre faisant un nombre considérable de tours sur un cadre circulaire extérieur MN. Les actions exercées sur les branches verticales AE, BF seront négligeables si ces branches sont très-petites, tout se réduit à l'effet du courant circulaire sur CA et CB, et l'on voit se produire le mouvement de rotation continue, dans le sens indiqué par la théorie.

2° Considérons en second lieu l'action de XY sur un courant rectangulaire *abcd* (*fig.* 329), mobile autour d'un axe vertical OO'; les parties *bc* et *da*, étant par rapport à XY dans le cas de la *fig.* 323, seront sollicitées chacune par un couple et tendront à se placer parallèlement à XY. Si XY est très-rapproché, l'action sur *ad* l'emportera; si XY est à l'infini, les deux couples seront égaux et se détruiront.

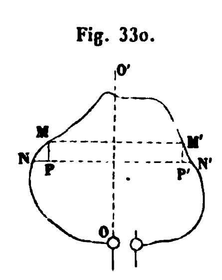
Fig. 329.



cd et *ab* étant perpendiculaires au plan horizontal qui passe par XY (comme O'C dans la *fig.* 322) seront sollicitées par des forces horizontales opposées p, p', qui formeront un couple, lequel tendra à placer le rectangle parallèlement à XY; son moment sera proportionnel aux longueurs *ab* et *cd*, et au bras de levier *ad*; il pourra se représenter par la surface du rectangle. Celui-ci se placera parallèlement à XY, et le sens du courant dans la branche horizontale la plus voisine du conducteur indéfini XY sera le même que dans ce dernier.

Si l'on fait la même expérience avec un courant fermé de forme quelconque (*fig.* 330), on pourra le décomposer en tranches par des plans parallèles et remplacer ses éléments MN, M'N' par leurs projections horizontale et verticale. Quand XY sera à l'infini, son effet sur les parties horizontales sera nul et se réduira sur les éléments verticaux à une infinité de couples proportionnels à la surface des quadrilatères tels que MN, M'N', ou à un couple unique proportionnel à la surface totale du courant mobile.

Fig. 330.



3° Il est facile d'imaginer des conducteurs sur lesquels XY n'exerce aucune action directrice : tels sont les suivants (*fig.* 331 et 332), qui se

composent de rectangles égaux traversés en sens inverse par le même courant, et sur lesquels XY exerce des actions égales et contraires.

Fig. 331.

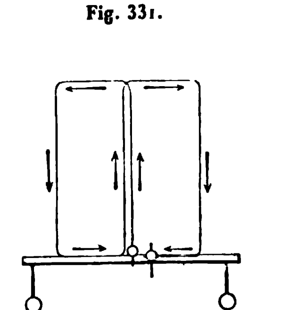
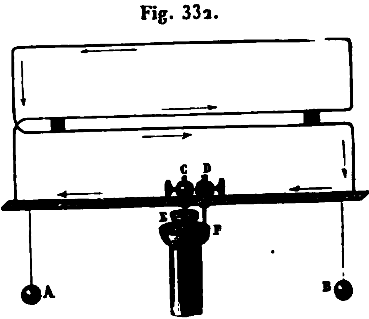
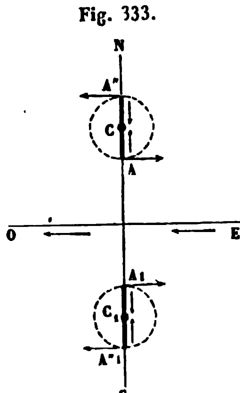


Fig. 332.



Action de la terre sur les courants. — 1° Recommençons l'expérience de la rotation d'un courant horizontal (*fig.* 328), mais supprimons le conducteur circulaire MN de façon que l'équipage mobile ne soit soumis à l'influence d'aucun courant voisin : nous le verrons néanmoins tourner dans un sens qui est constant. Si le lieu d'observation C (*fig.* 333) est situé dans l'hémisphère boréal, la rotation se fait dans le sens des flèches A et A″; s'il est placé dans l'hémisphère austral en C_1, le mouvement a lieu dans la direction des flèches A_1, A''_1. Tout se passe comme s'il y avait vers l'équateur un courant indéfini allant de E en O, de l'est à l'ouest.

Fig. 333.



2° Reprenons de même le conducteur *abcd* (*fig.* 329), suspendons-le autour de son axe vertical, sans le soumettre à l'action d'un courant horizontal XY; nous le verrons néanmoins se placer dans la direction de l'est à l'ouest, comme si le courant XY existait dans le voisinage.

3° Mais si l'on place un des deux courants rectangulaires (*fig.* 331 ou *fig.* 332) sur leur support, ils n'éprouvent aucun effet.

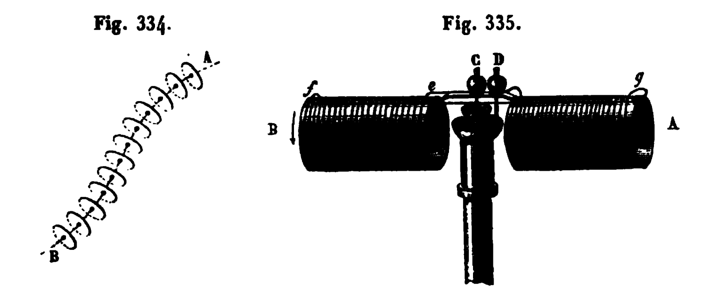
On se rend compte de ces actions en admettant que la terre est entourée dans le voisinage de l'équateur d'un courant qui va de l'est à l'ouest suivant un grand cercle. Ce cercle se nomme *équateur magnétique*. Quant à la cause qui produit ce courant, on l'a cherchée dans le mouvement du

soleil autour de la terre et dans les diverses actions calorifiques du globe. Nos connaissances sont encore très-peu avancées sur ce point.

III. — LES SOLÉNOIDES.

Ampère a nommé *solénoïdes* des assemblages de courants circulaires parallèles et de même sens dont les plans sont perpendiculaires à un axe AB (*fig.* 334). On les réalise approximativement en enroulant sur un cylindre de carton un fil de cuivre enveloppé de soie et terminé aux pointes C et D

Fig. 334. Fig. 335.



(*fig.* 335), de façon que l'appareil puisse être soutenu sur le support des courants mobiles. Nous allons chercher leurs propriétés.

1° *Direction d'un solénoïde par la terre.* — La terre étant traversée par un courant de l'est à l'ouest, chacun des cercles qui constitue le solénoïde se dirigera dans ce plan; par conséquent, l'axe du solénoïde se place du nord au sud. On nomme *pôle nord* ou *pôle austral* l'extrémité qui se dirige vers le *nord*, *pôle sud* ou *boréal* celle qui regarde le *sud*.

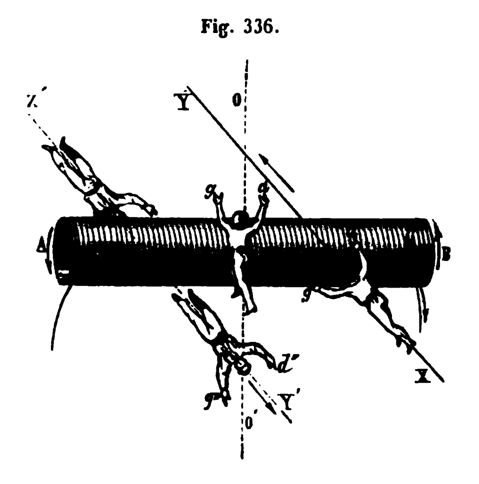
Soit X'Y' (*fig.* 336) le courant terrestre allant de l'est X' à l'ouest Y'; représentons-le par une poupée qui serait couchée sur le dos, ayant les pieds en X', la tête en Y', la gauche g'' vers le nord, la droite d'' vers le sud. Le courant du solénoïde sera dans la partie inférieure parallèle à X'Y', il pourra se représenter par une poupée qui aura toujours sa gauche g vers le nord, sa droite d vers le sud.

Donc, dans un solénoïde, le pôle austral est à la gauche, le pôle boréal à la droite de son propre courant.

2° *Direction d'un solénoïde par un courant.* — Remplaçons le courant terrestre par un autre de direction quelconque et que nous figurerons encore par X'Y'; il agira de même. Donc : 1° le solénoïde se met en

croix avec un courant indéfini X'Y'; 2° son pôle austral se met à la gauche de ce courant.

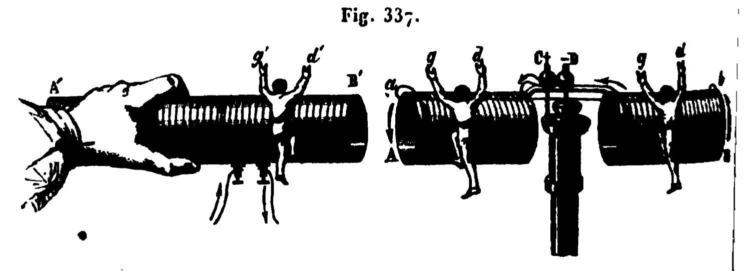
Fig. 336.



On peut voir que, si l'on met au-dessus du solénoïde un courant XY inverse de X'Y' qui était au-dessous, la direction du solénoïde sera la même.

3° *Les pôles de deux solénoïdes se repoussent ou s'attirent.* — En plaçant deux solénoïdes sur le prolongement l'un de l'autre (*fig.* 337) de manière qu'ils soient opposés par leurs pôles contraires A et B', les cou-

Fig. 337.



rants sont parallèles, et, par suite, ils s'attirent. Si l'on retournait l'un d'eux, les pôles de même nom seraient en regard, les courants seraient contraires et ils se repousseraient.

4° La figure montre que les deux solénoïdes AB, A'B' peuvent être réunis et n'en faire qu'un seul, ou séparés, et qu'alors ils en forment deux, op-

posés par leurs pôles contraires; donc, *en coupant un solénoïde en deux parties, chacune d'elles devient un solénoïde unique.*

5° L'expérience prouve que la force attractive ou répulsive de deux pôles de solénoïdes diminue avec la distance. Le calcul prouve que *ces forces sont en raison inverse du carré de cette distance.*

6° Puisque la terre représente un courant, on peut dire qu'elle est un solénoïde dont l'axe est très-petit et dirigé du nord au sud. Le courant allant de l'est à l'ouest, le pôle sud de la terre est à la gauche, le pôle nord à la droite du courant.

En résumé, les solénoïdes ont deux pôles, le pôle austral est à la gauche du courant; ils s'attirent ou se repoussent par les pôles de nom contraire ou de même nom, en raison inverse du carré des distances; la terre est un solénoïde dont l'axe coïncide à peu près avec l'axe de rotation du globe.

LIVRE V.

ÉLECTRO-MAGNÉTISME.

CHAPITRE PREMIER.

THÉORIE ET CONSTITUTION DES AIMANTS.

I. — LES AIMANTS SONT DES SOLÉNOIDES.

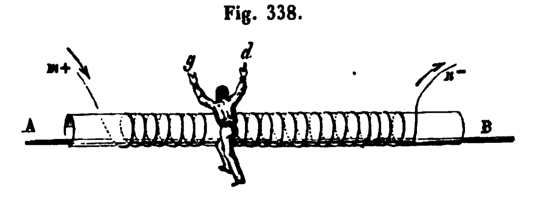
On trouve parmi les minerais de fer un oxyde mixte (Fe^3O^4) dont les fragments attirent le fer. On les nomme *aimants*, et l'on désigne sous le nom de *magnétisme* ou la cause de cette attraction ou l'ensemble des phénomènes qui en résultent.

Il n'y a rien de régulier dans la forme de ces aimants naturels, rien de fixe dans la distribution de la vertu attractive à leur surface, et on ne connut rien de précis sur la constitution des aimants avant d'avoir réussi à aimanter l'acier. Alors seulement on put faire des barreaux de forme convenable, et produire des effets réguliers.

La découverte de ces aimants artificiels a précédé celle des courants, et, comme on ne pouvait rattacher leurs propriétés à l'électricité alors inconnue, on avait imaginé des fluides magnétiques analogues aux fluides électriques. L'étude des solénoïdes a prouvé, depuis, que cette hypothèse est inutile : nous la laissons donc entièrement de côté et nous allons montrer que les aimants ne sont que des solénoïdes.

Je suppose qu'on place une aiguille de fer doux AB dans un solénoïde

Fig. 338.



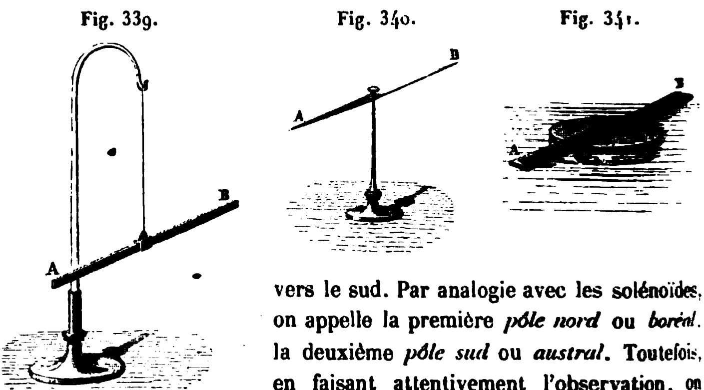
(*fig.* 338); elle ne changera aucune de ses propriétés, mais elle les avi-

vera considérablement. Ainsi le système se dirigera du nord au sud, et il repoussera ou attirera par ses pôles de même nom et de nom contraire un système pareil à lui. Il faut conclure de là que le fer est devenu un véritable solénoïde, parallèle au premier et beaucoup plus intense que lui.

Ces propriétés durent autant que celles du solénoïde lui-même; elles disparaissent aussitôt qu'on interrompt le courant. Mais il n'en est plus de même si l'on remplace le fer par des barreaux d'acier trempé. Dans ce cas, les propriétés persistent après la rupture du circuit, et l'on a des solénoïdes permanents. Ce sont des aimants; nous allons les étudier spécialement.

Direction par la terre. — Quand on suspend un aimant par son centre de gravité à l'extrémité d'un fil, sur une chape ou sur un liége (*fig.* 339, 340, 341), on voit l'une des extrémités se diriger vers le nord, l'autre

Fig. 339. Fig. 340. Fig. 341.

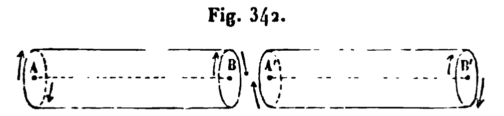


vers le sud. Par analogie avec les solénoïdes, on appelle la première *pôle nord* ou *boréal*, la deuxième *pôle sud* ou *austral*. Toutefois, en faisant attentivement l'observation, on reconnaît que la direction de l'aiguille aimantée n'est pas exactement celle du méridien géographique, et pour définir cette direction, on a nommé *méridien magnétique* le plan vertical qui passe par l'aiguille, et *déclinaison magnétique* l'angle que fait ce plan avec le méridien géographique. La déclinaison est *orientale*, quand le pôle nord est dévié du côté de l'orient, et *occidentale* dans le cas contraire.

Action réciproque des pôles de deux aimants. — Marquons par les lettres N, S les pôles nord et sud de deux aimants et, laissant l'un suspendu librement, approchons-en l'autre. Nous verrons les pôles marqués des mêmes lettres se repousser et ceux marqués de lettres différentes s'attirer, ce qui est conforme à la loi fondamentale des solénoïdes.

Si l'on vient à briser un barreau aimanté, les deux fragments prennent des pôles contraires, comme le font les deux parties séparées d'un même solénoïde (*fig.* 342).

Fig. 342.



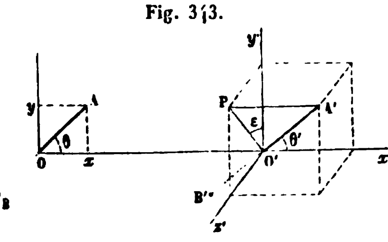
Enfin on peut prendre un aimant et un solénoïde et les opposer l'un à l'autre. On les verra s'attirer ou se repousser absolument comme s'ils étaient ou deux solénoïdes ou deux aimants. Cette expérience décisive établit nettement l'identité des deux sortes d'appareils.

Théorie d'Ampère. — Cette identité absolue dans les effets des solénoïdes et des aimants exige l'identité de leur constitution. Pour la faire concevoir, Ampère a imaginé l'hypothèse suivante : il a admis que les molécules de fer ou d'acier sont enveloppées à l'état naturel par des courants préexistants de direction quelconque et tels, qu'il y en ait autant dans un sens que dans le sens contraire, de sorte qu'ils se détruisent. Vient-on à les soumettre à l'influence d'un solénoïde tout formé, ils se dirigent parallèlement aux courants de ce dernier et constituent par eux-mêmes une série de solénoïdes élémentaires qui ajoutent leurs effets. Quand il s'agit de fer doux, ces courants reprennent leur direction quelconque aussitôt que cesse la cause qui les a dirigés. Si l'on opère sur l'acier, les courants gardent leur place et l'aimantation persiste indéfiniment. Nous allons confirmer cette hypothèse en montrant par de nombreux exemples que les aimants se comportent toujours comme des solénoïdes.

II. — ACTION DES COURANTS SUR LES AIMANTS.

On peut dans toutes les circonstances calculer l'attraction d'un solénoïde sur un assemblage quelconque de courants. En effet, Ampère a démontré (*fig.* 343) que deux éléments de courant $OA = s$ et $O'A' = s'$, d'intensités i et i', qui font des angles θ et θ' avec la ligne OO' qui joint leurs centres, qui sont avec cette ligne dans deux plans différents dont l'angle est ε, et dont la distance est r, exercent l'un sur l'autre une attraction ou une répulsion F

Fig. 343.



représentée par la formule

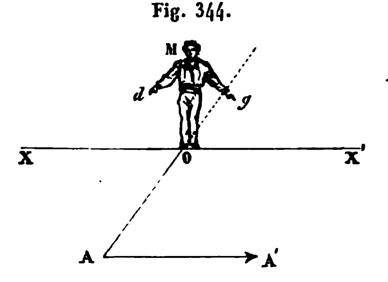
$$F = \frac{ii'ss'}{r^2}(\sin\theta \sin\theta' \cos\varepsilon - \tfrac{1}{2}\cos\theta\cos\theta').$$

Cette formule exprime donc l'action élémentaire de deux courants. Si maintenant on examine deux courants finis de forme géométrique et de position réciproque connue, on pourra les décomposer tous deux en leurs éléments et calculer l'action résultant des forces exercées par tous les éléments de l'un sur tous les éléments de l'autre, laquelle pourra toujours se réduire à une force et un couple.

1° Un solénoïde étant un assemblage de courants, on peut calculer son action sur un autre solénoïde, et on trouve qu'elle se réduit à quatre forces : deux attractions entre les pôles contraires, et deux répulsions entre les pôles de même nom, lesquelles sont en raison inverse du carré des distances des pôles en question. On verra bientôt que la même loi s'applique aux aimants.

2° Soit un élément de courant OM représenté par la poupée d'Ampère et regardant le pôle A d'un solénoïde (*fig.* 344). On a calculé les actions de tous les éléments du solénoïde sur OM, et on a trouvé qu'elles se composent en une résultante unique appliquée au milieu du courant OM, perpendiculaire au plan AOM, et agissant vers la droite de la poupée si A est un pôle austral : de façon que le solénoïde transporterait le courant de O vers X sur la ligne XX' perpendiculaire au plan AOM. Si A était un pôle boréal, la résultante serait dirigée du côté opposé.

Fig. 344.

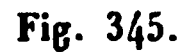


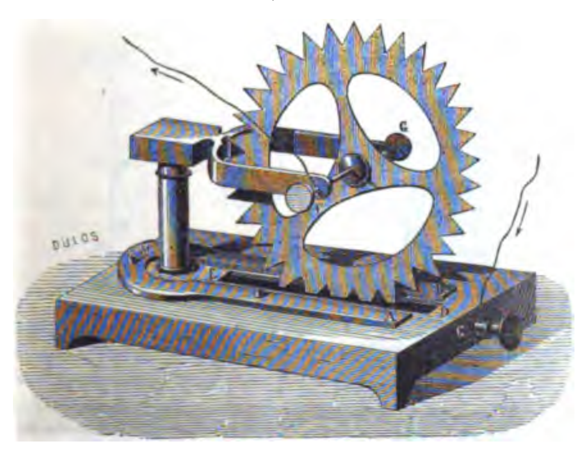
Pour prouver que les aimants se comportent comme les solénoïdes, il faut faire l'expérience en mettant en A le pôle austral d'un aimant et en montrant qu'il agit comme celui d'un solénoïde; on le fait au moyen de l'appareil de *Barlow*. C'est une roue dentée de cuivre, évidée pour être plus légère, et mobile autour d'un axe GF (*fig.* 345). Les dents viennent, quand elle tourne, lécher la surface d'un bain de mercure dans une auge ED. Un courant électrique qui arrive au mercure par le bouton C, remonte verticalement par les dents de la roue du contour vers le centre, et retourne par l'axe au pôle négatif. Enfin un aimant AMB, qui est fixé sur la base de l'appareil, présente ses deux pôles A et B aux deux faces de la roue.

La poupée placée dans le courant mobile sera verticale, elle aura les pieds sur la pointe des dents, la tête vers l'axe FG; si elle regarde le pôle austral A, elle sera sollicitée par une force dirigée vers sa droite de D en C. Si elle se retourne pour regarder le pôle boréal B, elle sera chassée vers sa gauche : ce sera encore de D en C. Aussi voit-on la roue se mouvoir de D vers C.

3° Non-seulement l'élément OM est sollicité vers sa droite par une force OX', mais, à cause de la loi de l'action et de la réaction, le pôle austral A du solénoïde est lui-même sollicité par une force contraire AA' (*fig.* 344), dirigée

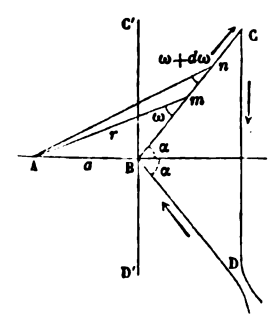
vers la gauche du courant. Le calcul prouve que cette force est en raison inverse du carré de la distance OA. Cela posé, imaginons un courant indéfini DBC


Fig. 345.



faisant un angle 2α (*fig.* 346), et un pôle A situé sur la bissectrice de cet angle, à une distance a de B. Ce pôle sera chassé par tous les éléments de DBC vers la gauche du courant, c'est-à-dire en avant du tableau. Il en résultera une force totale F qu'on a calculée et qui est

Fig. 346.



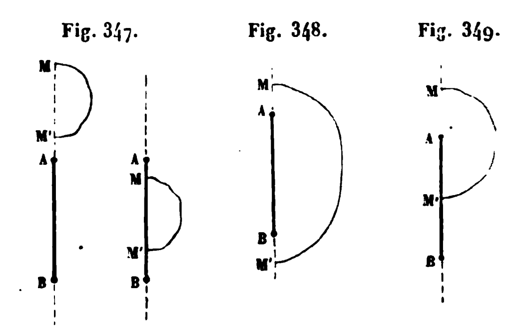
$$F = \frac{\mu}{a} \operatorname{tang} \frac{\alpha}{2},$$

en raison inverse de la distance a et proportionnelle à la tangente de la moitié de α. Si donc on place un courant perpendiculairement au méridien magnétique en face d'une petite aiguille aimantée, celle-ci oscillera sous l'influence de la terre, si le courant ne passe pas, en vertu d'une force f, et s'il passe, en vertu d'une force $F + f$. Par le même calcul que celui qui sert à mesurer la répulsion magnétique de deux aiguilles, on pourra calculer F. Les expériences ont été faites par Biot et Savart, en mettant non pas un solénoïde, mais un aimant en A, et ils ont trouvé que la formule était vérifiée.

4° On a encore calculé le moment de rotation d'un courant MM' autour de l'axe d'un aimant AB (*fig.* 347, 348, 349). On a trouvé qu'il est nul quand le courant part de l'axe AB pour y revenir, comme dans les *fig.* 347 et 348, mais qu'il y a rotation quand il part d'un point M extérieur aux pôles pour se terminer en M' entre A et B, comme dans la *fig.* 349. Ce calcul est fait pour un solé-

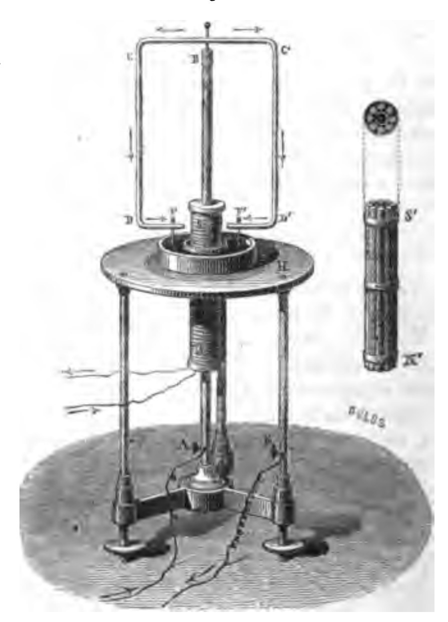
noïde. On va en vérifier le résultat et pour un solénoïde et pour un aimant. AB (*fig.* 350) est une colonne de cuivre isolée par une base d'ivoire, et par la-

Fig. 347. Fig. 348. Fig. 349.



quelle le courant arrive dans une coupe B; il descend ensuite le long de deux branches mobiles BCD, BC′D′, formees par un tube d'aluminium, et il vient par deux pointes F et F′ très-voisines l'une de l'autre dans un godet annulaire de fer plein de mercure; de là il est ramené par les supports jusqu'en K, et enfin jusqu'à la pile. On voit que les parties mobiles CD, C′D′ du courant sont limitées aux points F et F′ très-voisins de l'axe. Un solénoïde NS, enroulé sur un cylindre creux, peut glisser le long de la ligne AB. Si on le soulève de manière à placer ses deux pôles entre les limites B et F du courant, ou qu'on l'abaisse jusqu'à les mettre tous deux au-dessous de B et de F′, on ne voit aucun mouvement dans le conducteur mobile; mais celui-ci se met à tourner quand le pôle S est au-dessus des deux pointes F et F′, et que le second pôle N est au-dessous.

Fig. 350.



Un solénoïde se conduit donc suivant les prévisions du calcul. On le remplace maintenant par un faisceau magnétique N′S′, et on reconnaît que le mouvement du conducteur se produit ou s'arrête quand l'aimant occupe les positions qu'il fallait donner au solénoïde pour le produire ou l'arrêter.

5° On peut aussi faire tourner un solénoïde par un courant. Soit (*fig.* 351) OAB la section d'un solénoïde plongeant dans du mercure et par lequel on fait

Fig. 351.

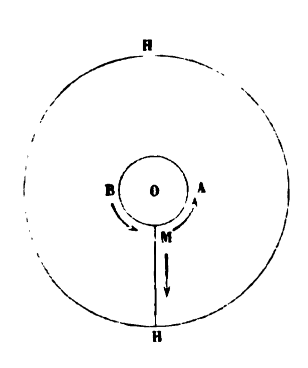
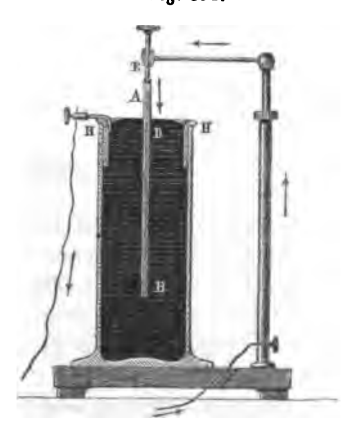


Fig. 352.



arriver un courant qui s'échappe des points extérieurs tels que M et va rejoindre un anneau métallique HH pour ensuite retourner au pôle négatif. Le courant du solénoïde se dirige suivant BMA. Or le point A est attiré, le point B repoussé par MH; donc le solénoïde devra tourner dans le sens AMB.

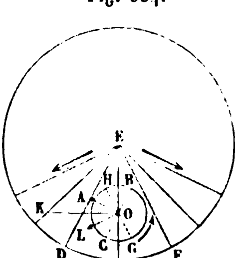
On fait l'expérience en plongeant dans une éprouvette HH pleine de mercure (*fig.* 352) un aimant AB lesté avec du platine et creusé en A d'une coupe où l'on met du mercure dans lequel plonge la pointe E. Le courant suit le chemin EADH, et l'aimant tourne, sous son influence, comme un solénoïde.

6° On peut encore faire marcher l'aimant en le plaçant excentriquement en A (*fig.* 353) et en abaissant la pointe E jusqu'au mercure. Les courants se

Fig. 353.



Fig. 354.



répandent en rayonnant dans le liquide (*fig.* 354). ED attire BAC et repousse BGC avec une force moindre, d'où une attraction OA perpendiculaire à DE; de même un courant symétrique EF produit une répulsion OL, et les

deux forces OL et OA se combinent en une résultante OK, qui transporte l'aimant suivant une spirale.

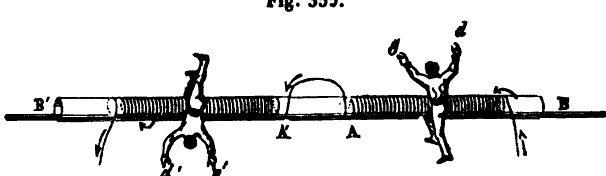
En résumé, toutes ces expériences prouvent que les solénoïdes et les aimants se comportent toujours identiquement, qu'on peut remplacer les uns par les autres, et comme les solénoïdes sont des assemblages de courants, il faut qu'il en soit de même des aimants.

III. — PHÉNOMÈNES D'INFLUENCE.

Influence par un solénoïde. — Nous avons vu qu'un morceau de fer placé dans un solénoïde devenait un solénoïde parallèle, ayant à gauche et à droite du courant des pôles austral et boréal. Il en serait de même si l'on mettait le fer à la suite du solénoïde, alors les deux appareils se toucheraient par des pôles de nom contraire (*fig.* 337) et le fer serait attiré.

Si l'on dispose sur un tube de verre deux hélices AB et A'B' de sens contraire (*fig.* 355), la droite du courant est dans chacune d'elles en d et

Fig. 355.



d' vers les extrémités B et B' : il s'y forme deux pôles boréaux, et la gauche est située en g et g' vers l'espace moyen AA' : on y voit un double pôle austral, c'est ce qu'on nomme un *point conséquent*. Si l'on emploie du fer doux, tous ces phénomènes disparaissent avec le courant. Avec l'acier l'aimantation est moins intense, mais elle persiste ; ce qui tient à ce que les courants particulaires étant peu mobiles sont difficilement amenés au parallélisme, mais y persistent. Les physiciens du siècle dernier exprimaient cette différence entre le fer et l'acier en disant que l'acier a une *force coercitive* et que le fer n'en a pas. Ce mot est encore employé, bien qu'il n'ait aucune signification.

Influence par un aimant. — Les mêmes phénomènes se produiront avec un aimant. Si nous approchons un fer doux A'B d'un pôle A (*fig.* 356), il deviendra un solénoïde parallèle ayant un pôle boréal en B

et un pôle austral en A′. B sera attiré par A. A′ sera repoussé; mais cette deuxième force étant moindre que la première, le fer sera définitivement attiré et adhérera au barreau. Dans cette position, BA′ sera un véritable aimant qui continuera le premier : A′ attirera de la limaille de fer (*fig.* 356); il attirera le pôle boréal *b* d'une aiguille aimantée (*fig.* 358); il aimantera et attirera un deuxième fer doux *mn* (*fig.* 357); celui-ci un

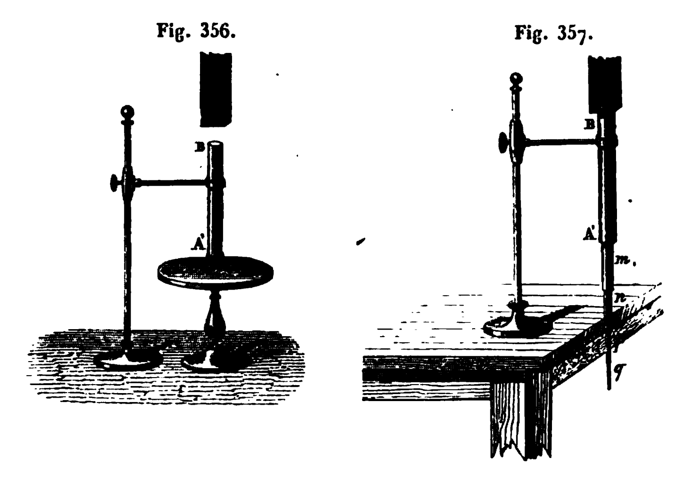


Fig. 356. Fig. 357.

troisième *np*, et ainsi de suite; mais la force de ces aimants, diminuant avec leur nombre, finira par être insensible.

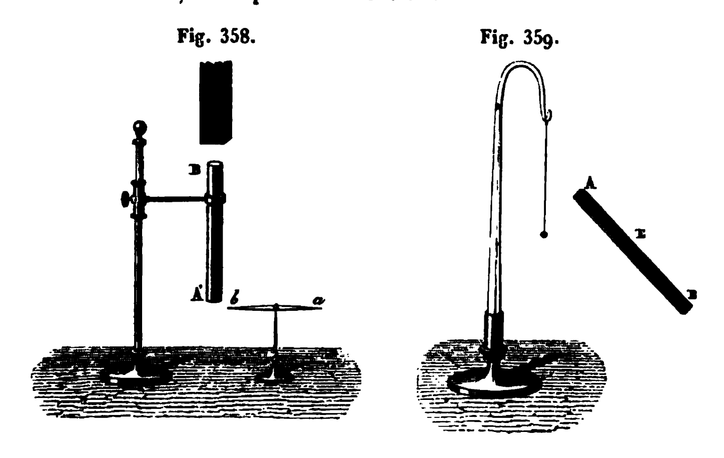


Fig. 358. Fig. 359.

La propriété fondamentale que possède l'aimant d'attirer le fer se con-

state de beaucoup de manières : en approchant le pôle d'un aimant d'une balle de fer (*fig.* 359); en roulant un barreau dans de la limaille de fer qui s'attache aux extrémités et se dispose comme une chevelure composée de grains qui adhèrent les uns aux autres (*fig.* 360). Ces effets se transmettent à travers les corps qui ne sont point magnétiques : on le prouve en plaçant un carton sur un aimant et en y semant de la limaille, qui se distribue en longues courbes (*fig.* 361).

Fig. 360.

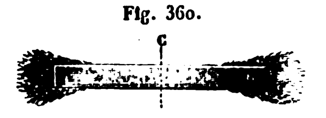
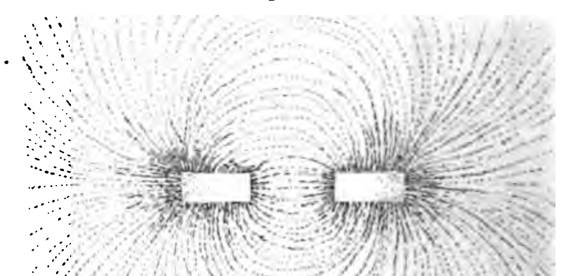


Fig. 361.



Influence par les courants. — On a vu qu'un solénoïde se met en croix avec un courant, et que son pôle austral se place à la gauche de ce courant. Par suite un fer doux s'aimantera et se placera de la même manière. Par suite aussi la limaille de fer s'attachera à un fil de cuivre traversé par un courant; chaque parcelle sera aimantée et en attirera d'autres qui toutes adhéreront entre elles et au fil. Elles se détacheront aussitôt que lè courant sera rompu. Cette expérience est due à Arago.

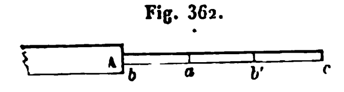
IV. PROCÉDÉS D'AIMANTATION. — AIMANTATION PAR LA TERRE.

En général, on aimante les barreaux d'acier par influence, en les frottant sur un aimant. Le magnétisme obtenu est d'autant plus énergique que cet aimant est plus fort; mais il diminue peu à peu avec le temps jusqu'à une limite fixe, à laquelle il se maintient ensuite indéfiniment. On

dit alors que le barreau est *saturé* ou *aimanté à saturation*. Il y a divers procédés d'aimantation :

Simple touche. — La simple influence, par le contact d'un aimant A sur un barreau *bc* (*fig.* 362), développe un pôle de nom contraire *b* contre le point A, puis un pôle de même nom en *c*. L'action s'accélère en frottant le barreau. Quand il est très-long, on voit quelquefois se former un second pôle de même nom en *a*; c'est ce qu'on nomme un *point conséquent*. Souvent même on en voit un autre en *b'*, qui est alors de signe contraire à A. En continuant la friction, ces points conséquents s'éloignent de *a* vers *c*, et finissent par atteindre l'extrémité, où ils se réunissent en un pôle de même nom que A.

Fig. 362.



Pour augmenter les effets de cette influence, on promène l'aimant sur le barreau de M en N (*fig.* 363); puis on l'enlève, on le ramène en M et on recommence à le faire marcher de M en N. Voici comment on peut concevoir l'action. Quand il est en A, l'aimant développe un pôle contraire au-dessous de lui. A mesure qu'il dépasse une molécule, elle prend un pôle de même nom *a* vers M et un pôle opposé *b* vers A; et quand l'aimant a atteint le point N, tout le barreau est aimanté dans le même sens. En recommençant, on augmente l'effet. C'est le procédé de la *simple touche*.

Fig. 363.

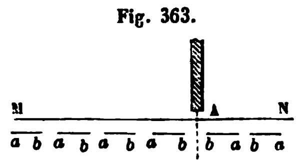
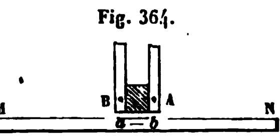


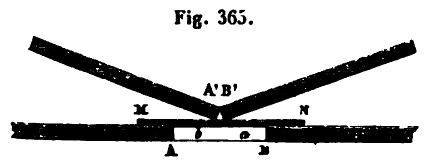
Fig. 364.



Double touche. — La double touche consiste à promener de M vers N, puis de N vers M (*fig.* 364) les pôles contraires A et B de deux aimants, séparés par une cale non magnétique.

Æpinus plaçait le barreau MN (*fig.* 365) sur les pôles opposés A et B de deux aimants qui déjà tendaient à l'aimanter par influence, puis il promenait au-dessus deux autres aimants, opposés comme précédemment par leurs pôles contraires A' et B', séparés par une cale de bois, et inclinés de 15 à 20 degrés sur l'horizontale.

Fig. 365.



Touche séparée. — Au lieu de laisser en contact les deux barreaux aimantés A′ et B′, on peut les séparer à partir du milieu de MN, et les promener en sens inverse. C'est le procédé de la *touche séparée.*

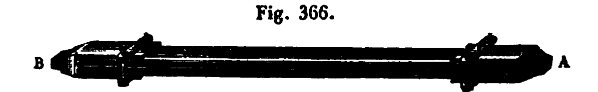
Aimantation par la terre. — La terre, agissant comme un aimant, doit aimanter un barreau de fer doux; c'est ce qui a lieu en effet. Plaçons une barre de fer dans la direction de l'aiguille d'inclinaison, sa partie inférieure devra être un pôle austral, et sa partie supérieure un pôle boréal. Pour s'en assurer, il suffit de présenter une aiguille aimantée aux extrémités de la barre, et l'on voit le pôle boréal attiré par le bout inférieur et repoussé par le bout supérieur.

Si, pendant qu'une tige de fer est dans cette situation, on réussit à lui donner de la force coercitive, elle conserve le magnétisme que lui imprime la terre, et comme on sait que la torsion, l'écrouissage, le choc produisent cet effet, on pourra disposer un paquet de fil de fer recuit, le diriger suivant l'aiguille d'inclinaison et le tordre dans cette position : il recevra et conservera du magnétisme austral en bas et boréal en haut. Il en est de même d'une barre de fer frappée avec un marteau pendant qu'elle est soumise à l'action de la terre.

Faisceaux magnétiques. — Pour augmenter la force des barreaux, on les réunit en faisceaux par les pôles de même nom. Mais alors ils s'influencent réciproquement, et tendent à se détruire. Au bout de quelque temps, les barreaux du centre sont désaimantés, et la force totale est considérablement diminuée.

Armatures. — Pour obvier à ces décompositions, on a imaginé les *armatures* (*fig.* 366). On engage chaque extrémité des lames aimantées

Fig. 366.

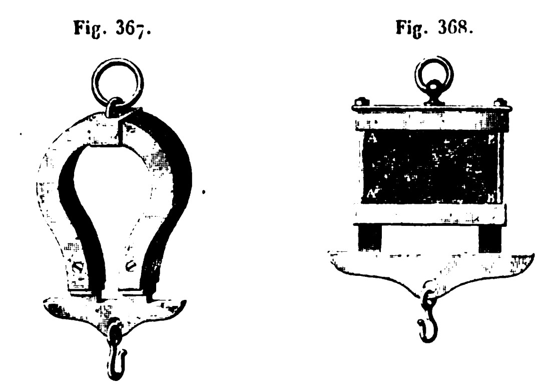


dans une masse de fer doux qui devient un véritable aimant et qui maintient par réaction le magnétisme des lames. Pour qu'elles s'influencent moins, Coulomb les échelonne de façon que celles du centre soient plus avancées que celles de l'extérieur.

Souvent on juge de la force des aimants par les poids qu'ils peuvent soulever : c'est ce qu'on nomme leur *force portative*. On l'augmente en recourbant les aimants en forme de fer à cheval (*fig.* 367 et 368), puis en adaptant contre les pôles une lame de fer doux qui se nomme le

contact. Il est clair qu'elle s'aimante sous l'influence des pôles. Elle porte un crochet auquel on suspend des poids, et ce qu'elle peut porter

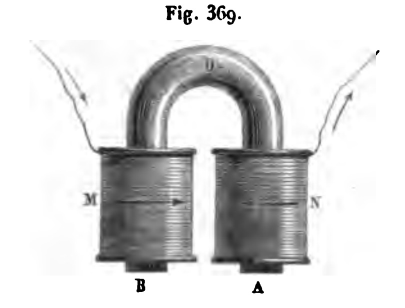
Fig. 367. Fig. 368.



est très-supérieur au double de ce que soutiendrait un seul pôle. Si on la laisse en adhérence pendant un jour, on peut lui ajouter un nouveau poids sans le faire tomber; le lendemain on peut en ajouter un second, et ainsi de suite successivement; de façon que la force portative augmente à mesure que le temps s'accroît. Il arrive pourtant un moment où le contact tombe, et si l'on essaye de le replacer, la force portative est redevenue ce qu'elle était au premier moment.

Aimantation par les courants. — Les meilleurs aimants ne portent pas plus de 250 kilogrammes. Mais on obtient des résultats incomparablement plus puissants en aimantant des masses de fer doux par

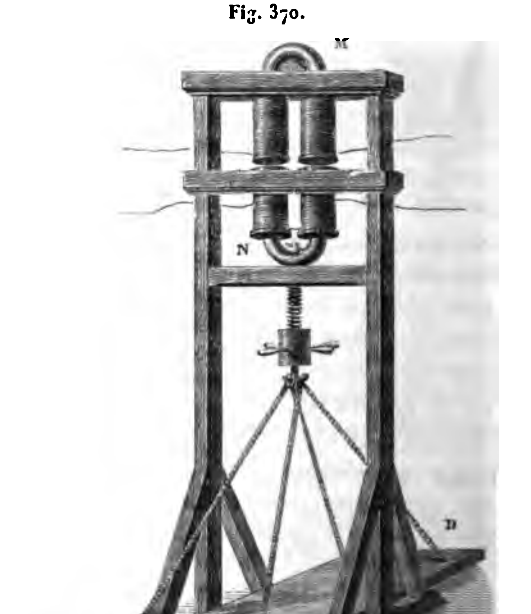
Fig. 369.



des courants. Ordinairement on les recourbe en fer à cheval AOB (*fig.* 369), et l'on entoure les deux extrémités de deux bobines de fils

enroulés en sens inverse, M et N, à travers lesquelles on fait passer le courant. Cet appareil se nomme *électro-aimant*. On peut le suspendre à une potence et lui présenter un contact de fer doux; celui-ci adhère aux pôles A et B, et il faut quelquefois plus de 1000 kilogrammes pour le séparer. La *fig.* 370 représente deux électro-aimants M, N, l'un fixe, l'autre mobile, qui s'attirent par leurs pôles de nom contraire et que l'on peut séparer par des poids placés sur la planche CD.

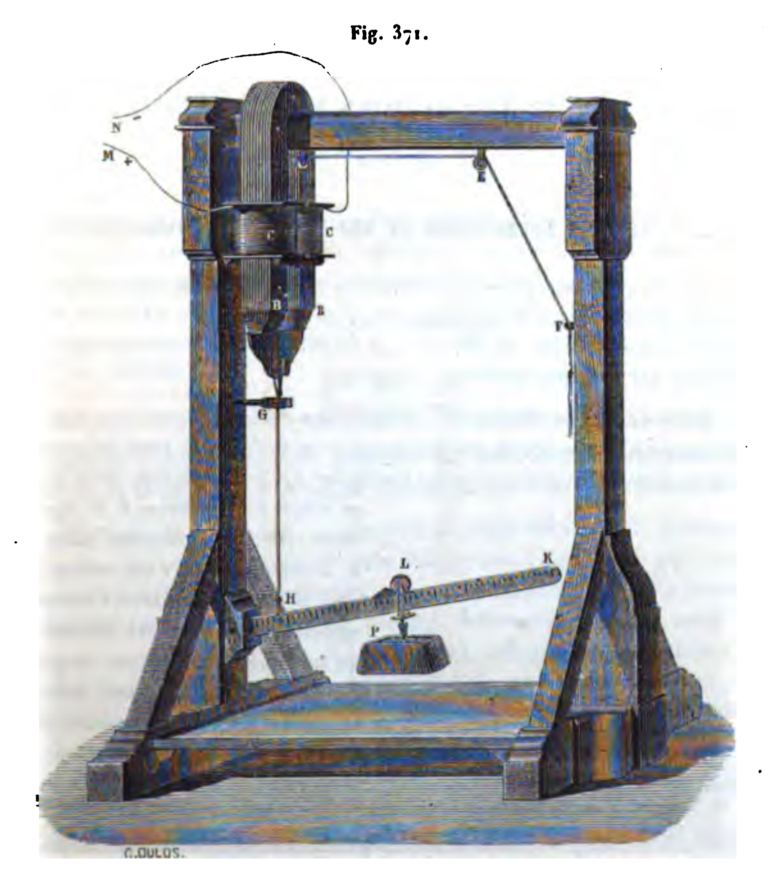
Fig. 370.



On aimante l'acier par les mêmes procédés. Il suffit d'envelopper les barreaux d'une bobine, de la faire glisser d'une extrémité à l'autre pendant un temps très-court, et l'acier prend aussitôt son maximum de force. La *fig.* 371 représente un très-fort aimant suspendu à une traverse et enveloppé de deux bobines C, C qu'on peut faire glisser par la corde EF. Le contact est fixé par une tige GH; elle s'attache à un levier HK dont le point d'appui est en O. En promenant un poids P le long de ce bras de le-

vier, on arrive peu à peu à la limite de charge. J'ai démontré qu'un pareil aimant pouvait porter jusqu'à 800 kilogrammes après l'aimantation

Fig. 371.



et garder cette force indéfiniment, tant que le contact reste fixé; mais aussitôt que ce contact a été arraché et qu'on veut le replacer, l'aimant ne porte plus que 300 kilogrammes, c'est sa force de saturation persistante.

CHAPITRE II.

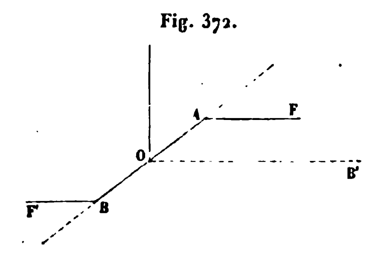
MESURE DES ACTIONS MAGNÉTIQUES.

I. — LOI DES ATTRACTIONS ET DES RÉPULSIONS MAGNÉTIQUES.

On sait que deux pôles de solénoïdes s'attirent ou se repoussent en raison inverse du carré des distances. Il doit en être de même de deux pôles d'aimant; c'est, en effet, ce que Coulomb a expérimentalement démontré par les deux méthodes suivantes :

Méthode des oscillations. — Suspendons horizontalement une aiguille aimantée AB, très-courte, de longueur l, à un fil de cocon assez long pour qu'on puisse négliger sa réaction élastique (*fig.* 372). L'action de la terre se réduit à deux forces F, F' égales entre elles, appliquées aux pôles A, B, à une distance l du milieu, et dont les moments seraient Fl si elles agissaient normalement. Fl est ce qu'on nomme le *moment magnétique* de l'aiguille. Quand celle-ci aura été écartée de sa position d'équilibre, elle oscillera comme un pendule, et la force F s'exprimera par la formule connue

Fig. 372.



$$F = \frac{N^2 \pi^2 l}{T^2}.$$

Après avoir fait osciller l'aiguille sous la seule action de la terre, plaçons en B' (*fig.* 372) dans la direction OB' du méridien magnétique, et à une distance d, le pôle boréal d'un aimant très-allongé et dressé verticalement, de façon que son pôle austral soit assez éloigné pour qu'on puisse négliger son effet. B' agira par attraction sur A et par répulsion sur B; il en résultera sur l'aiguille un système de deux forces opposées et appliquées aux deux pôles A et B; et comme l'aiguille est très-courte, nous admettrons qu'elles sont égales et parallèles, et que la distance de B' aux pôles A et B est sensiblement égale à OB'. Soit F' la valeur de ces

forces. L'aiguille sera maintenant soumise à l'action de la terre et à celle du pôle B', ou à deux forces F + F' appliquées en chaque pôle; le nombre d'oscillations pendant le temps T sera N', et l'on aura

$$F + F' = \frac{N'^2 \pi^2 l}{T^2}.$$

En retranchant cette équation de la précédente, il viendra

$$F' = (N'^2 - N^2)\frac{\pi^2 l}{T^2};$$

ensuite on changera de place le pôle B' et on le placera à une distance d'; puis, recommençant les mêmes mesures, on trouvera N" oscillations pendant le temps T, et on aura

$$F'' = (N''^2 - N^2)\frac{\pi^2 l}{T^2},$$

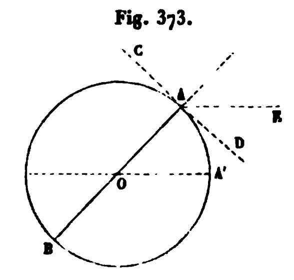
et, en divisant,

$$\frac{F'}{F''} = \frac{N'^2 - N^2}{N''^2 - N^2}.$$

Coulomb a trouvé, par cette méthode, que deux pôles magnétiques s'attirent ou se repoussent en raison inverse du carré de leurs distances.

Méthode de la torsion. — Coulomb se servit ensuite de la balance de torsion que nous avons décrite dans l'Électricité (*fig.* 224, p. 260); seulement il prit un fil de suspension plus gros, auquel il attacha un barreau aimanté très-léger et très-long. La *fig.* 373 représente une coupe de l'instrument : AB est l'aimant mobile, OA' la direction du méridien.

Fig. 373.



Il fallait préalablement mesurer l'effort que fait la terre pour ramener le barreau dans le méridien, quand on l'a écarté d'un angle α; pour cela, Coulomb tordit le fil de deux circonférences de A' vers A, et l'aimant fut dévié de 20 degrés. A ce moment, il était soumis à deux forces qui se faisaient équilibre, l'une agissant de A en C, qui se mesure par l'angle de torsion, $2 \times 360° - 20° = 700°$; l'autre, dirigée de A en D, qui est la composante tangentielle de l'action terrestre, et qui est sensiblement proportionnelle à l'angle AOA', ou à 20 degrés. Donc, pour chaque degré de déviation, l'action de la terre est égale à $\frac{700}{20}$ ou à 35 degrés.

Coulomb mit alors en A′ le pôle austral d'un aimant fixe, dressé verticalement. Le barreau AB fut repoussé à 24 degrés. Coulomb ramena l'écart d'abord à 17 degrés et ensuite à 12 degrés en tordant le fil d'abord de 3 et ensuite de 8 circonférences. Dans ces trois cas, les écarts étaient

$$24°, \quad 17°, \quad 12°,$$

les torsions

$$24°, \quad 3 \times 360° + 17°, \quad 8 \times 360° + 12°.$$

Pour avoir les forces répulsives totales, il fallait ajouter à ces angles l'action de la terre qui équivaut à 35 degrés de torsion par degré de déviation. Cela donnait

$$24° + 24.35°, \quad 3.360° + 17° + 17.35°, \quad 8.360° + 12° + 12.35°.$$

En réduisant, on a pour les forces répulsives,

$$864°, \quad 1692°, \quad 3312°.$$

Ces nombres, devant être en raison inverse des carrés des distances 24, 17, 12, doivent être égaux à

$$3312\left(\frac{12}{24}\right)^2, \qquad 3312\left(\frac{17}{24}\right)^2, \qquad 3312,$$

et l'on trouve, en faisant le calcul,

$$828°, \quad 1650°, \quad 3312°.$$

On voit donc que les répulsions des deux aimants sont en raison inverse des carrés des distances. Il en est de même des attractions.

II. — LOI DE LA DISTRIBUTION MAGNÉTIQUE.

Idées théoriques. — Si l'on considère un solénoïde élémentaire formé par des cercles infiniment petits perpendiculaires à l'axe de l'instrument, il a deux pôles rigoureusement placés aux extrémités; il semblerait donc qu'il doive en être de même pour un aimant. Cependant l'expérience prouve que les pôles de cet appareil sont à une certaine distance de ses deux bouts.

Pour expliquer cette différence, il faut remarquer qu'un aimant est un prisme dans lequel les molécules peuvent être groupées en files AB, *ab*, *a′b′* (*fig.* 374) sensiblement parallèles à l'axe; elles sont entourées par

des courants circulaires de même sens, dont les plans sont perpendiculaires aux lignes AB, ab, ..., et constituent ainsi un faisceau de solénoïdes.

Fig. 374.

A cause de la symétrie, la file de molécules centrale AB est l'axe du cylindre ; les autres solénoïdes élémentaires ab, $a'b'$, ..., se repoussant par leurs pôles de même nom, s'inclinent de manière à tourner leur convexité vers l'axe, et à présenter leurs pôles aux points a, a', b, b', ... sur la surface extérieure.

On voit qu'un aimant présente, non un pôle unique, mais une multitude de pôles élémentaires de plus en plus nombreux vers les extrémités, de plus en plus rares et faibles vers le milieu, où il y a une ligne moyenne. Mais tous les pôles partiels de même nom peuvent se résumer sensiblement en un seul situé sur l'axe, en α vers l'extrémité supérieure, en β vers le bout opposé.

Distribution du magnétisme dans les aimants. — D'après ces idées théoriques, nous devons nous attendre à trouver, à la surface des aimants d'une grande longueur et d'une section très-petite, des intensités magnétiques croissant depuis le milieu jusqu'aux pôles. Pour s'en assurer, Coulomb suspendait dans la balance de torsion une aiguille aimantée qui se dirigeait dans le méridien magnétique. Soit A (*fig.* 375) la section de cette aiguille par un plan perpendiculaire, CD une règle mince de bois, et ab un aimant fixe opposé à A par son pôle de même nom. La torsion qu'il fallait imprimer au fil pour établir le contact augmentait quand le point de recoupement m s'approchait de l'extrémité a, et dans chaque cas elle est sensiblement proportionnelle à l'intensité du magnétisme de ce point m. En effet, les points tels que p et q agissant obliquement sur A et à des distances qui croissent rapidement à mesure qu'on s'éloigne de m, on peut dire que la force répulsive est exclusivement produite par un élément pq très-petit, ayant en tous ses points un magnétisme égal à celui de son milieu m. Mais si l'on amène le point a en face de A, il n'y a plus que la moitié de cet élément qui agit; alors il faut doubler l'intensité obtenue. C'est ce que fit Coulomb. Il construisit la courbe des intensités en élevant en chaque point de la ligne AB (*fig.* 376) des ordonnées proportionnelles aux répulsions mesurées en ces points, et avec des signes contraires dans les deux moitiés, pour distinguer les deux magnétismes. En désignant par l la longueur AM, l'équation empirique de cette courbe est

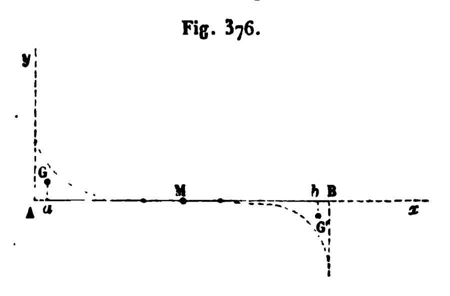
Fig. 375.

$$y = A(\mu^x - \mu^{2l-x}).$$

Les ordonnées sont à peu près nulles sur tous les points, à l'exception des

extrémités, et croissent très-rapidement en approchant de A et de B. Toutes les aiguilles de diverses longueurs extraites d'un même fil d'acier et aimantées jusqu'à la saturation offrent la même courbe aux extrémités.

Fig. 376.



Les pôles étant les points d'application des résultantes des actions exercées par un point magnétique situé à l'infini sur tous les éléments magnétiques de chaque moitié du barreau, on trouvera ces pôles en cherchant les centres de gravité G, G' des aires de chaque moitié de la courbe et les projetant en *a* et *b* sur l'axe de l'aimant. Comme on a l'équation de la courbe, ceci n'est plus qu'une affaire de calcul, et l'on a trouvé que dans les aiguilles de Coulomb les pôles étaient à 41 millimètres des extrémités. Cette distance est constante pour toutes les aiguilles de même section et aimantées jusqu'à la saturation, puisque les deux branches de la courbe des intensités sont les mêmes dans tous ces aimants. Cependant, quand les longueurs diminuent indéfiniment, les courbes en se rapprochant finissent par s'altérer et par devenir deux triangles opposés à leur sommet, et leur centre de gravité étant au tiers de leur hauteur, les pôles se trouvent au tiers de chaque demi-longueur de l'aimant.

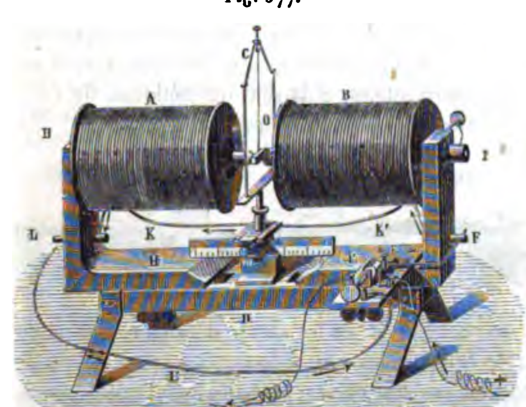
III. — SUBSTANCES MAGNÉTIQUES ET DIAMAGNÉTIQUES.

Outre le fer, il y a encore quelques métaux attirables à l'aimant : ce sont le nickel, le cobalt, le manganèse et le chrome. Quant aux autres substances, on les a pendant longtemps considérées comme indifférentes.

Cela tenait à ce que l'on employait des aimants trop faibles. Faraday a étendu la liste des corps magnétiques, en opérant avec l'appareil suivant que construit M. Ruhmkorff (*fig.* 377). Il se compose de deux électro-aimants A et B, dont les pôles contraires sont placés en regard en O, et qui sont reliés l'un à l'autre par des équerres de fer doux pouvant glisser et se fixer sur un banc de même métal D. On place entre les deux pôles un support C, destiné à soutenir par un fil de cocon CO les substances qu'on veut essayer. Supposons qu'on ait suspèndu en O une petite aiguille de fer CD (*fig.* 378), elle s'aimantera longitudinalement et se placera suivant la ligne axiale AB; si on la remplace par une balle sphérique de fer, elle sera attirée par celui des pôles dont elle est le plus rapprochée.

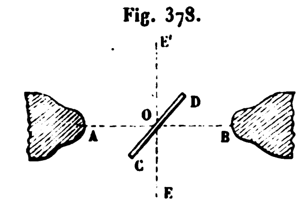
Ce n'est pas là du tout ce qui se passe quand on remplace le fer par du bismuth. Un petit barreau horizontal CD se place, suivant EE′, per-

Fig. 377.



pendiculairement à la ligne des pôles ou équatorialement, et une petite balle est repoussée par chacun des deux pôles quand on la met en contact avec lui. L'action est d'ailleurs beaucoup moins énergique sur le bismuth qu'elle ne l'était sur le fer.

Fig. 378.



En étudiant toutes les substances qu'il put se procurer, Faraday trouva qu'elles se conduisent toutes, ou comme le fer avec un degré d'énergie à la vérité beaucoup moindre, ou comme le bismuth. Les premières sont *magnétiques*, les secondes ont été nommées *diamagnétiques*, pour rappeler la position d'équilibre qu'elles prennent.

I. Les métaux magnétiques sont plus nombreux qu'on ne l'avait pensé; outre ceux que nous avons déjà nommés, il faut citer le cérium, le titane, le palladium, le platine, l'osmium, le lanthane, le molybdène et l'uranium. Les sels de ces métaux sont généralement magnétiques eux-mêmes.

II. Tous les autres métaux sont diamagnétiques. Voici l'ordre dans lequel ils se rangent d'après leur puissance diamagnétique décroissante : bismuth, antimoine, zinc, étain, cadmium, mercure, plomb, argent, cuivre, or, tungstène.

III. Les métalloïdes sont diamagnétiques, ainsi que leurs composés;

ceux qui le sont le plus, sont : le soufre, le phosphore, le charbon, la cire, le bois, et en général les matières organiques.

IV. Pour étudier les liquides, on les enferme dans des tubes de verre très-minces qui n'éprouvent aucune influence sensible. On peut aussi comme le fit Plücker, les disposer en couches très-minces dans un verre de montre, ou sur une carte entre les pôles A et B sur des armatures planes et horizontales. S'ils sont magnétiques, ils s'accumulent sur les bords et y forment deux saillies parallèles (*fig.* 379). Quand ils sont

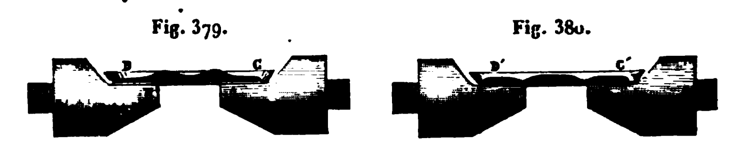


Fig. 379. Fig. 380.

ortement diamagnétiques, on les voit se déprimer, et deux gorges creuses remplacer les deux saillies (*fig.* 380).

On reconnaît par ces divers procédés que l'eau, l'alcool, l'éther, les huiles, les essences, le sulfure de carbone, etc., sont diamagnétiques.

V. L'action des aimants sur les gaz a été, pour la première fois, mise en évidence par Bancalari, au moyen d'une expérience fort belle : il plaça la flamme d'une bougie un peu au-dessous des deux pôles entre deux armatures terminées en pointe. Au moment où le courant commença à passer dans l'électro-aimant, il la vit se déprimer et se jeter des deux côtés de l'axe. Le même effet se produisant sur un courant d'air chaud, il faut conclure que les gaz à une certaine température sont diamagnétiques, puisqu'ils sont repoussés.

Faraday étudia à la température ordinaire des courants gazeux qu'il rendait visibles par des fumées ammoniacales. Ils étaient attirés ou repoussés. On constata ainsi que l'oxygène est notablement magnétique, que le bioxyde d'azote l'est faiblement, et que tous les autres gaz, mais surtout l'hydrogène et le gaz d'éclairage, sont diamagnétiques.

Ces expériences nous montrent que les corps à tous les états physiques peuvent se partager en deux grandes classes : les uns magnétiques, attirés par l'aimant et se dirigeant suivant l'axe des pôles ; les autres diamagnétiques, repoussés par chaque pôle, et se dirigeant équatorialement ; et depuis le fer jusqu'au bismuth, on peut les classer en une série continue, d'abord ceux où la force est attractive et va en décroissant, ensuite ceux où elle est nulle, et enfin ceux où l'action est répulsive et augmente.

Divers expérimentateurs ont comparé le pouvoir magnétique ou diama-

gnétique de plusieurs substances. M. Ed. Becquerel a donné le tableau suivant :

Fer....................	+ 1 000 000
Perchlorure de fer.......	+ 140
Eau....................	— 9,68
Oxygène................	+ 377
Air.....................	+ 88

On voit que l'oxygène est quatre fois plus magnétique que l'air, ce qui prouve que l'azote est indifférent. 1 mètre cube d'oxygène équivaut à 54 centigrammes de fer, et l'atmosphère tout entière agit comme une couche de fer qui envelopperait la terre et aurait $\frac{1}{10}$ de millimètre d'épaisseur.

Explication du diamagnétisme. — On sait que si l'on présente un morceau de fer à un pôle austral, il se forme à son extrémité un pôle contraire qui est attiré. Le diamagnétisme résulte d'une action opposée ; il se forme un pôle de même nom. Voilà pourquoi le barreau est repoussé. On le démontre en plaçant un barreau de bismuth dans une spirale traversée par un courant, et en lui présentant une aiguille aimantée. On reconnaît que le barreau a pris un magnétisme opposé à celui que prendrait le fer dans les mêmes conditions.

Ces faits paraissent en opposition avec la théorie d'Ampère, qui perdrait ainsi sa généralité. On va voir que cette opposition n'est pas cependant aussi radicale qu'elle le paraît.

Faraday reconnut, en effet, que la nature du milieu ambiant peut changer complétement les propriétés des corps. Par exemple, un tube contenant une solution de sulfate de fer est magnétique dans l'air ; il le devient davantage dans l'eau ou l'alcool ; mais il devient diamagnétique dans une solution de sulfate de fer plus concentrée que celle qu'il contient.

Cela s'explique par le principe d'Archimède.

Plaçons dans le voisinage d'un pôle d'aimant une cuve pleine d'un liquide : il n'éprouve aucun mouvement. Or isolons par la pensée une masse quelconque dans son intérieur : elle est sollicitée par le pôle avec une force f, positive ou négative suivant qu'elle est magnétique ou diamagnétique ; et comme elle ne se déplace pas, il faut que le milieu qui l'entoure exerce sur elle une poussée $-f$ égale et contraire. Remplaçons maintenant cette masse que nous avons isolée, par une autre qui soit limitée à la même surface, mais qui soit de nature différente ; elle éprouvera, de la part de l'aimant, une action différente f' positive ou négative, et de la part du liquide une même poussée $-f$; la résultante sera $f' - f$.

Par conséquent l'action que le pôle d'un aimant exerce sur un corps quelconque plongé dans un milieu fluide, est égale à la différence de celles qu'il exercerait séparément sur ce corps et sur le fluide qu'il déplace.

Quand le milieu est magnétique, f est positive, et $f' - f$ tend à être négative; par conséquent, un corps quelconque tend à devenir diamagnétique. Inversement, dans un milieu diamagnétique, f est négative; la substance tend à être magnétique.

Or tous les corps de la nature sont plongés dans l'éther, et ce milieu, qui transmet la lumière et l'attraction, qui a de la masse, pourrait très-bien être magnétique. En résumé on se trouve dans cette alternative, ou de supposer la loi d'Ampère très-particulière, et de ne point expliquer le diamagnétisme, ou d'admettre la généralité de cette loi et la propriété magnétique de l'éther; alors le diamagnétisme se prévoit. M. Ed. Becquerel a admis avec raison, je crois, cette dernière solution.

CHAPITRE III.

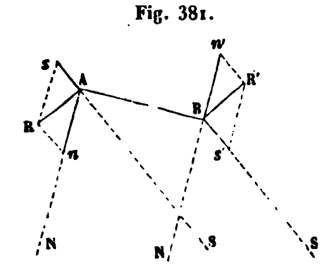
MAGNÉTISME TERRESTRE.

I. — L'ACTION DE LA TERRE SE RÉDUIT A UN COUPLE.

Couple terrestre. — Nous allons démontrer que la direction prise par l'aiguille aimantée aux divers points du globe est précisément celle que lui donnerait l'action d'un aimant qui serait situé au centre de la terre, c'est-à-dire à l'infini.

En effet, le pôle nord N de cet aimant terrestre (*fig.* 381) attirerait A et repousserait B par deux forces A*n*, B*n'*, égales et parallèles. Le pôle sud S exercerait sur B une attraction B*s'*, sur A une répulsion A*s*, et si l'on compose A*s* et A*n* d'une part, B*s'* et B*n'* de l'autre, l'effet de l'aimant terrestre se réduira, s'il existe, à un couple AR — BR', et l'aiguille AB prendra, si elle est librement suspendue, une direction parallèle aux deux lignes AR, BR', sans offrir aucune tendance à se transporter dans l'espace.

Fig. 381.

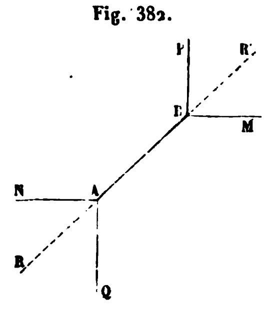


Nous savons déjà qu'en effet l'aiguille aimantée se dirige, c'est-à-dire qu'elle obéit à l'action d'un couple. Pour démontrer qu'elle ne prend aucun mouvement de translation, on la fait flotter sur l'eau; elle se dirige dans le méridien magnétique en tournant sur elle-même, sans se transporter; il n'y a donc pas de force motrice horizontale. Il n'y a pas non plus de force verticale, car l'aimantation ne change pas le poids de l'aiguille. Or, puisque ses composantes horizontale et verticale sont nulles, la force motrice n'existe pas, et l'aiguille n'obéit qu'à un couple.

Définition de l'inclinaison et de la déclinaison. — Il faut mesurer la direction de ce couple en divers lieux pour en déduire la position de l'aimant terrestre. Si l'on pouvait suspendre l'aiguille par son centre de gravité sur un système d'axes qui lui permît de prendre toutes les positions

possibles, elle se placerait parallèlement aux forces AR, BR'. Mais la difficulté de réaliser ce système de suspension a contraint les observateurs à diviser le problème en deux parties. On a décomposé les forces terrestres AR, BR' (*fig.* 382) en composantes horizontales, AN, BM, et verticales AQ, BP. Si l'aiguille, soutenue sur un pivot, est forcée de rester horizontale, elle est exclusivement dirigée par le couple horizontal AN, BM, et se place dans le plan vertical du couple total. C'est ce plan que nous avons nommé *méridien magnétique*; sa position est déterminée par l'angle qu'il forme avec le méridien géographique, ou la *déclinaison*.

Fig. 382.



Si une autre aiguille, soutenue par un axe horizontal, est dirigée dans le méridien magnétique, elle obéit à la fois aux deux composantes du couple terrestre et prend la véritable direction RABR' qu'elle devrait avoir dans l'espace si elle était libre. Elle fait alors avec l'horizontale un certain angle que l'on nomme *inclinaison*.

En résumé, si nous cherchons en chaque lieu d'abord la trace horizontale du méridien magnétique, puis l'inclinaison de l'aiguille dans ce plan, nous aurons complétement déterminé la situation du couple terrestre.

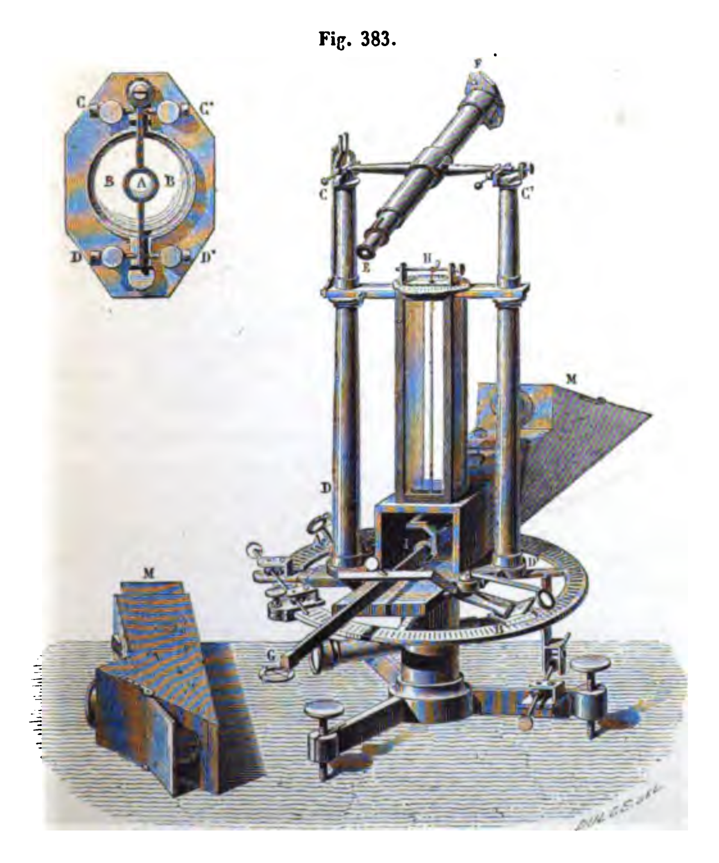
II. — MESURE DE LA DÉCLINAISON.

Mesure de la déclinaison. — On emploie, pour mesurer la déclinaison, divers modèles de boussoles; nous ne décrirons ici que celle de Gambey (*fig.* 383).

Elle est portée sur un trépied à vis calantes surmonté d'un cercle azimutal divisé AB. Dans le pied s'engage un axe vertical avec lequel tournent toutes les parties supérieures CDC'D', dont les positions se mesurent sur le cercle AB, au moyen de deux verniers opposés A et B. Ces pièces mobiles servent, les unes à supporter l'aimant, les autres à trouver la direction du méridien géographique. Décrivons d'abord celles-ci. Deux colonnes de cuivre CD, C'D' soutiennent une lunette EF qui se meut dans un plan vertical. On la dirige vers un astre connu, et quand il passe sous le réticule des fils, on note l'heure vraie et on lit la position des verniers sur le cercle azimutal. Cette observation permet de calculer l'azimut de

l'astre au moment de l'observation, ou sa distance au méridien géographique; on tourne alors l'alidade d'une quantité égale à cette distance, et la lunette se trouve dans le méridien.

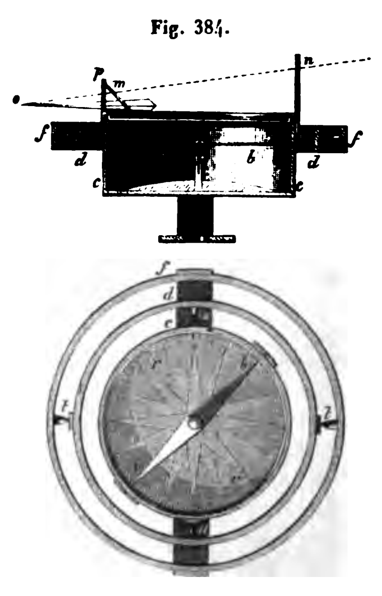
Fig. 383.



Les deux colonnes CD, C'D' portent encore un treuil H, sur lequel on enroule un paquet de fils de cocon qui soutiennent un étrier I dans lequel est placé le barreau aimanté GM. Quand celui-ci, dirigé par la terre, a pris son équilibre, on fait tourner le système autour de l'axe vertical jusqu'au moment où, en regardant avec la lunette, on voit les deux extrémités G du barreau sous le réticule. La lunette est alors dans le plan du méridien magnétique, et l'angle dont il a fallu faire tourner l'appareil mesure la déclinaison. Pour corriger les erreurs de collimation,

on vise successivement les deux extrémités du barreau, puis on le retourne sur lui-même et l'on recommence : on prend les moyennes de ces lectures.

Fig. 384.



En mer, on emploie la boussole représentée en coupe et en plan (*fig.* 384). Elle est enfermée dans une cuve *cc*, lestée avec du plomb et suspendue à la Cardan de façon qu'elle se tienne horizontalement malgré les mouvements du navire. Au centre de la cuve s'élève le pivot qui soutient l'aiguille *ab*, laquelle adhère à un cercle de mica doublé d'une rose des vents. L'aiguille entraîne le mica de façon que, si elle a été primitivement fixée de manière à faire avec NS un angle égal à la déclinaison du lieu, elle dirige NS dans le méridien géographique et place la rose des vents dans sa situation vraie, quelle que soit la direction du navire.

III. — MESURE DE L'INCLINAISON ET DE L'INTENSITÉ.

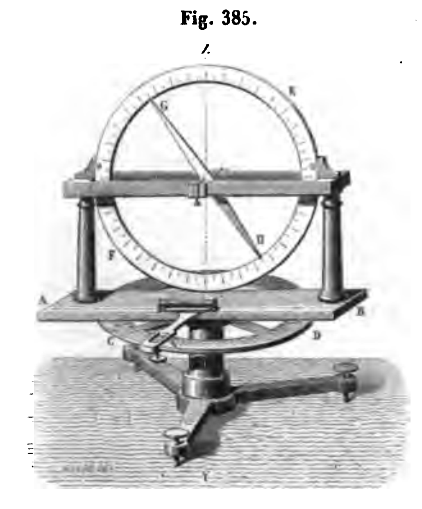
Mesure de l'inclinaison. — Pour déterminer l'inclinaison, il faut suspendre une aiguille aimantée par son centre de gravité sur un axe horizontal, diriger son plan d'oscillation dans le méridien magnétique, et mesurer l'angle que la ligne des pôles fait avec l'horizon.

La *boussole d'inclinaison* porte un cercle azimutal immobile CD sur un pied à vis calantes (*fig.* 385), et dans le pied, au centre du cercle, tourne un axe vertical sur lequel est fixé un limbe divisé FEX, qui peut être amené dans tous les azimuts possibles et dont on mesure les positions au moyen d'un vernier V. C'est au centre de ce limbe que l'aiguille GH est soutenue par un pivot qui passe à son centre de figure et de gravité, et qui tourne sur deux arêtes d'acier où il est déposé.

Si le limbe FE est fixé dans le méridien magnétique, il suffira de lire les divisions vis-à-vis lesquelles s'arrêtent les deux extrémités de l'ai-

guille, la moyenne des lectures donnera l'angle que l'aimant fait avec le diamètre horizontal. Cette observation est sujette à trois causes d'erreur, que nous allons examiner.

Fig. 385.



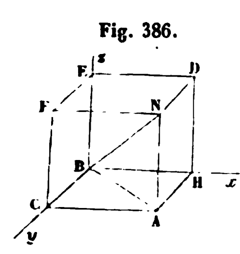
1° Il se peut que la ligne o — 180 ne soit pas horizontale, et cela augmente ou diminue l'inclinaison trouvée. Pour corriger l'erreur, on retourne le limbe de 180 degrés, ce qui change le sens de l'obliquité de la ligne o — 180 et aussi le sens de l'erreur, et l'on prend la moyenne des observations faites avant et après ce retournement du plan.

2° L'axe de figure qui joint les deux pointes de l'aiguille n'est pas toujours confondu avec la ligne des pôles. Il faut alors enlever l'aiguille, la retourner sur elle-même de façon à changer les deux faces de place et recommencer, quand elle a pris cette nouvelle position, les quatre observations qui ont été faites quand elle occupait la précédente.

3° Enfin si l'axe de suspension de l'aiguille ne passe pas exactement par son centre de gravité, le poids agit pour augmenter ou diminuer l'inclinaison. On change le sens de l'erreur en changeant l'aimantation de signe. Pour cela, on désaimante et ensuite on réaimante l'aiguille en sens contraire avec de forts aimants, puis on recommence les mesures.

Il reste à savoir comment on peut ou bien faire coïncider exactement le limbe vertical avec le méridien magnétique, ou bien se passer de cette condition. Soit BN l'intensité et la direction de l'une des forces du couple terrestre appliquée au pôle B (*fig.* 386); c'est la direction que prend l'aiguille. Le plan vertical zBA est le méridien magnétique, et l'angle NBA est l'inclinaison i. On peut décomposer la force en trois composantes rectangulaires :

Fig. 386.



$$z = \text{F} \sin i, \quad x = \text{F} \cos i \cos \alpha, \quad y = \text{F} \cos i \sin \alpha,$$

α étant l'angle que fait le plan des zx avec le méridien magnétique. Si le limbe du cercle était placé dans le plan zx, l'ai-

guille serait soumise à l'action des deux composantes x et z, et l'inclinaison exprimée par

$$\tang i' = \frac{z}{x} = \frac{\sin i}{\cos i \cos \alpha} = \frac{\tang i}{\cos \alpha}.$$

Elle est minimum quand $\alpha = 0$, c'est-à-dire dans le méridien magnétique; elle augmente avec α et devient égale à 90 degrés pour $\alpha = 90$ degrés, c'est-à-dire dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique. On pourra donc trouver ce méridien par la condition que l'inclinaison soit minimum, ou bien on cherchera l'azimut qui rend l'aiguille verticale, on tournera ensuite le limbe de 90 degrés et il sera placé dans le méridien.

Toutefois il ne faut pas trop compter sur cette méthode, par la raison qu'on n'est pas sûr de l'équilibrage parfait de l'aiguille, ni que le diamètre 0 — 180 du limbe soit bien horizontal. Il vaut mieux opérer de la manière suivante.

Dans deux plans rectangulaires quelconques zx et zy, la valeur de l'inclinaison est donnée par les formules

$$\tang i' = \frac{\tang i}{\cos \alpha}, \quad \tang i'' = \frac{\tang i}{\sin \alpha};$$

de là on tire

$$\frac{1}{\tang^2 i'} + \frac{1}{\tang^2 i''} = \frac{1}{\tang^2 i}.$$

Par conséquent, on pourra mesurer les valeurs particulières i', i'' de l'inclinaison dans deux plans rectangulaires quelconques, et, par la formule précédente, calculer l'inclinaison vraie i. C'est la seule méthode à laquelle on doive s'arrêter.

Intensité magnétique. — Le couple terrestre n'est pas invariable; il faut mesurer les variations de son intensité. On fait osciller une aiguille d'inclinaison dans le plan du méridien magnétique. Elle est sollicitée à ses deux pôles par les deux forces du couple terrestre, et ses mouvements suivent la même loi que ceux du pendule. Par conséquent, la force I qui agit à chaque pôle, et qui mesure l'intensité du magnétisme terrestre, est proportionnelle au carré du nombre N d'oscillations effectuées pendant un temps donné. Si l'on transporte l'aiguille dans un autre lieu et qu'on répète les mêmes opérations, on aura une autre valeur I' de l'intensité, on trouvera un autre nombre N' d'oscillations, et le rapport de I à I' sera

$$\frac{I}{I'} = \frac{N^2}{N'^2}.$$

Si l'on opère de la même manière avec l'aiguille horizontale, c'est la composante horizontale qui met l'aiguille en mouvement, et il faut remplacer I et I' par $I \cos i$ et $I' \cos i'$: i et i' étant les valeurs de l'inclinaison aux deux stations.

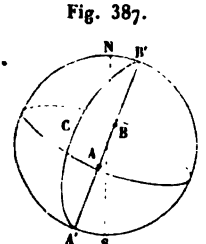
$$\frac{I \cos i}{I' \cos i'} = \frac{N^2}{N'^2}.$$

IV. — ÉTAT MAGNÉTIQUE DU GLOBE.

Un grand nombre d'observateurs ont mesuré l'inclinaison, la déclinaison et l'intensité magnétique en divers points du globe. Toutes ces observations ont été réunies, et elles ont conduit à penser que la terre agit sur tous les points de sa surface comme s'il y avait à son centre un aimant gros et court ou, ce qui produirait le même effet, un courant perpendiculaire à l'axe de cet aimant. Voyons d'abord quelles seraient les propriétés du globe si cette condition était réalisée, et nous verrons ensuite si le globe les possède réellement.

I. Soit AB cet aimant (*fig.* 387), on pourrait mener un grand cercle perpendiculaire au milieu de AB : ce serait l'*équateur magnétique*. En tous les points de ce cercle l'aiguille aimantée serait : 1° horizontale; 2° parallèle à l'axe magnétique AB, 3° perpendiculaire à la direction de la courbe tracée; 4° l'intensité magnétique serait partout égale. Le calcul prouve qu'elle serait plus petite sur cet équateur que sur tous les autres points du globe.

Fig. 387.



II. Pour marquer les latitudes magnétiques, que nous appellerons λ, on pourrait tracer des *parallèles magnétiques* comme on trace des parallèles géographiques en menant une série de plans perpendiculaires à AB, et, à cause de la symétrie, l'inclinaison serait constante dans toute leur étendue, et ils seraient des courbes d'égale inclinaison ou *isocliniques*. En second lieu, l'intensité serait la même en tous les points de chacun d'eux, et ils seraient des courbes *isodynamiques*.

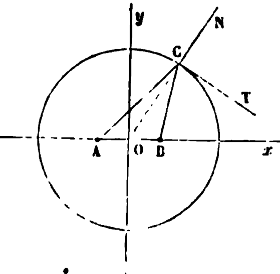
III. L'axe prolongé de l'aimant AB viendrait couper la surface du globe en deux points A', B', qui seraient les *pôles* de l'équateur magnétique. En ces points, les actions magnétiques exercées par A et B seraient toutes deux verticales, et, par conséquent : 1° l'inclinaison serait égale à 90 degrés; 2° l'aiguille de déclinaison ne serait sollicitée par aucune force et se mettrait en équilibre dans toutes les directions; 3° enfin le calcul prouve que l'intensité serait maxima et deux fois plus grande qu'à l'équateur.

IV. On pourrait mener par l'axe magnétique AB une série de grands cercles tels que BCA'; ils seraient les *méridiens magnétiques*; leur trace marquerait sur le globe les directions de l'aiguille horizontale, et la déclinaison serait en chaque point égale à l'angle des méridiens géographique et magnétique se coupant en ce point.

V. Enfin, parmi tous les méridiens magnétiques, il y en aurait deux qui contiendraient à la fois l'axe magnétique AB et l'axe géographique NS, et la déclinaison serait nulle dans toute leur étendue; il y aurait donc deux lignes *sans déclinaison*, allant du pôle nord au pôle sud, toutes deux situées dans le même plan mené par AB et NS.

VI. **Calcul de l'intensité et de l'inclinaison.** — On peut aller plus loin, calculer l'intensité et l'inclinaison sur les divers points du globe constitué comme nous l'avons supposé.

Fig. 388.



Soient A et B (*fig.* 388) les deux pôles de l'aimant supposé. Désignons par a les distances OA, OB de chacun d'eux au centre, par r le rayon du globe, et examinons l'action des pôles sur un élément magnétique austral placé en un point quelconque C de la surface. Cette action pourra se représenter par deux forces, l'une $\frac{1}{\overline{BC}^2}$ attractive, l'autre $\frac{1}{\overline{AC}^2}$ répulsive, et toutes deux se réduiront à deux autres forces, la première N, agissant suivant la normale CN, et la deuxième T, dirigée suivant la tangente CT. On aura

$$N = \frac{1}{\overline{BC}^2}\cos OCB - \frac{1}{\overline{AC}^2}\cos OCA,$$

$$T = \frac{1}{\overline{BC}^2}\sin OCB + \frac{1}{\overline{AC}^2}\sin OCA.$$

Si nous désignons par λ la latitude magnétique COy, nous aurons $COB = 90° - \lambda$, et, dans le triangle OCB,

$$\sin OCB = \frac{OB}{BC}\sin COB = \frac{a\cos\lambda}{BC};$$

de même, dans le triangle OCA,

$$\sin OCA = \frac{OA}{AC}\sin COA = \frac{a\cos\lambda}{AC};$$

donc

$$T = a\cos\lambda\left(\frac{1}{\overline{BC}^3} + \frac{1}{\overline{AC}^3}\right).$$

Lorsque les points A et B sont très-voisins du centre, a est une quantité très-petite par rapport à r, et l'on peut prendre, dans la formule ci-dessus $AC = BC = r$, d'où

$$T = \frac{2a\cos\lambda}{r^3}.$$

Les sinus des angles OCB, OCA étant de l'ordre de $\frac{a}{r}$, on peut dans N supposer

leurs cosinus égaux à l'unité. Ensuite

$$\overline{BC}^2 = a^2 + r^2 - 2ar\sin\lambda,\quad \overline{AC}^2 = a^2 + r^2 + 2ar\sin\lambda,$$

d'où

$$\overline{AC}^2 - \overline{BC}^2 = 4ar\sin\lambda;$$

par conséquent

$$N = \frac{4ar\sin\lambda}{\overline{BC}^2.\overline{AC}^2} = \frac{4a\sin\lambda}{r^3}.$$

N et T sont les composantes verticale et horizontale de la force qui sollicite l'aiguille et qui fait avec l'horizon un angle égal à l'inclinaison; on a donc

$$(1)\qquad \operatorname{tang} i = \frac{N}{T} = 2\operatorname{tang}\lambda.$$

L'intensité F^2 de la force résultante est égale à la somme des carrés des composantes,

$$F^2 = \frac{4a^2}{r^6}(4\sin^2\lambda + \cos^2\lambda) = \frac{4a^2}{r^6}(1 + 3\sin^2\lambda),$$

et si l'on prend pour unité l'intensité quand $\lambda = 0$,

$$(2)\qquad F = \sqrt{1 + 3\sin^2\lambda}.$$

Nous allons maintenant chercher si ces diverses circonstances sont réalisées sur le globe terrestre; nous n'aurons besoin pour cela que de résumer les observations des voyageurs. C'est un travail qui a été exécuté par Duperrey, et nous allons en faire connaître les résultats.

Équateur magnétique. — Il y a réellement une courbe sur laquelle l'inclinaison est nulle. Sans être d'une régularité parfaite, elle est très-sensiblement figurée par un grand cercle qui coupe l'équateur terrestre en deux points que l'on nomme les *nœuds*, situés, le premier auprès de l'île San-Tomé, par 30°20′ de longitude orientale; le second, moins bien déterminé, se trouve entre 166°25′ de longitude occidentale et 175°44′ de longitude orientale. Le plan moyen de cette courbe fait un angle de 10°49′ avec l'équateur et son axe percerait la surface du globe en deux points situés dans les régions polaires,

L'un par...........	79°11′ N.	et	78°20′ O.
L'autre par.........	79°11′ S.	et	101°40′ E.

L'équateur magnétique ainsi déterminé satisfait sensiblement à toutes les conditions qui le caractérisent : c'est-à-dire que l'aiguille aimantée est en chacun de ses points à peu près perpendiculaire à son plan et parallèle à une direction fixe AB, et que l'intensité varie très-peu dans toute son étendue.

Méridiens magnétiques. — La propriété qui caractérise les méridiens magnétiques est qu'une aiguille de déclinaison qui les parcourt est toujours contenue dans leur plan du nord au sud; Duperrey les a construits graphiquement d'après cette propriété. Ce ne sont point des grands cercles de la sphère, ni même des courbes planes. A mesure que l'on s'éloigne de l'équateur, ils tendent à se rapprocher et viennent enfin concourir en deux points extrêmes. Là il n'y a plus de déclinaison, et l'inclinaison est de 90 degrés; ce sont les pôles magnétiques de la terre. Leur position géographique est :

Pour l'un	70° 5′ N.	et	90° 12′ O.
Pour l'autre.......	75° 20′ S.	et	130° 10′ E.

Il n'y a pas une grande différence entre ces points et les pôles de l'équateur magnétique.

Parallèles magnétiques. — Duperrey a également tracé les parallèles magnétiques d'après la condition qu'ils soient perpendiculaires aux méridiens en chaque point. Dans notre hypothèse, ces lignes doivent avoir la même latitude magnétique et par conséquent la même inclinaison; mais cela ne se réalise pas. Ensuite elles doivent avoir la même intensité magnétique, et l'on trouve qu'il n'en est rien. A cause de ces irrégularités, on a été conduit à tracer en même temps que ces parallèles des lignes d'égale inclinaison ou *isocliniques*, et des lignes d'égale intensité ou *isodynamiques*.

Lignes sans déclinaison. — Dans l'hypothèse de l'aimant central, le plan qui contient les axes magnétique et géographique doit dessiner sur la surface du globe un grand cercle sur lequel la déclinaison est nulle. Les observations montrent effectivement qu'il existe deux lignes sans déclinaison qui se rencontrent aux deux pôles magnétiques, mais, loin d'être situées dans un même plan, elles se montrent très-irrégulières. L'une traverse aujourd'hui l'Amérique du Nord. Partant de la baie d'Hudson, elle coupe vers New-York la côte orientale du continent et continue sa route à travers l'Atlantique jusqu'au cap Saint-Roch qu'elle traverse pour se plonger de nouveau dans la mer et se diriger du nord au sud vers le pôle magnétique sud. L'autre ligne est moins régulière et moins connue: on la trouve à l'est du Spitzberg et dans le mer Blanche, après quoi elle se perd dans la Russie d'Asie, où on ne l'a pas suivie; mais elle doit s'incliner considérablement vers l'est, car on la retrouve sur la côte orientale de l'Asie dans la mer d'Okhotsk. On la suit le long du Japon jusqu'au-dessus de Canton, après quoi elle traverse l'Inde de l'est à l'ouest,

passe auprès de Bombay, et, revenant une seconde fois vers l'orient, longe Java et coupe l'Australie du nord au sud.

En résumé, nous trouvons sur la terre les circonstances que la théorie avait prévues. Si elles sont modifiées sensiblement, cela tient aux conditions locales, aux roches magnétiques ou diamagnétiques, à des courants terrestres particuliers, à l'action de l'électricité atmosphérique, etc. Mais il y a une circonstance dont il nous reste à parler, qui ne peut se concilier avec l'idée d'un aimant terrestre : c'est que le magnétisme de la terre est dans un état perpétuel de fluctuation : déclinaison, inclinaison et intensité changent partout d'heure en heure, de mois en mois, d'année en année, de façon que l'état magnétique que nous avons précédemment décrit, et qui était vrai vers 1825, n'a pas toujours été celui de la terre, et qu'il se modifie chaque jour de plus en plus. On ne sait pas les lois générales de cette transformation, mais on en connaît quelques détails que nous allons exposer.

Variations de la déclinaison. — Quand on a commencé à observer à Paris l'aiguille horizontale, son extrémité nord était pointée à l'est du méridien; la déclinaison était donc orientale. Peu à peu elle a diminué; elle était nulle en 1663, puis elle a changé de signe, et l'aiguille s'est déviée de plus en plus vers l'ouest jusqu'en 1814. Elle paraît avoir accompli aujourd'hui son excursion occidentale et semble commencer à rétrograder vers l'orient. Voici le tableau des observations :

Valeurs de la déclinaison à Paris.

ANNÉES.	DÉCLINAISONS.	ANNÉES.	DÉCLINAISONS.
1580	11°.30′ Est	1822	22°.11′
1618	8.00	1823	22.23
1663	0.00	1824	22.23
1678	1.30 Ouest	1825	22.22
1700	8.10	1827	22.20
1767	19.16	1828	22.06
1780	19.55	1829	22.12
1785	22.00	1832	22.03
1805	22.05	1835	22.04
1813	22.28	1849	20.34
1814	22.34 max.	1850	20.31
1816	22.25	1851	20.25
1817	22.19	1858	19.41
1818	22.22	1861	19.26
1819	22.29	1864	18.58

Des changements semblables se sont produits dans tous les États de

l'Europe, et il est constant que la ligne sans déclinaison qui passe maintenant à travers l'Amérique se trouvait sur Paris en 1663. Vraisemblablement l'autre ligne qui traverse aujourd'hui l'Asie, l'Inde et l'Australie viendra dans la suite des temps la remplacer. Il est facile de voir que ces changements, en déplaçant l'aiguille en chaque point, changent aussi la direction de tous les méridiens magnétiques et que les cartes dressées par Duperrey ne représentent l'état du globe que pour les années voisines de 1825, époque où elles ont été dressées.

Ce n'est pas seulement d'année en année que la déclinaison change, c'est encore d'heure en heure. Tous les matins, à Paris, le pôle nord marche vers l'ouest et continue de s'avancer jusqu'à 2 heures; après quoi il rétrograde, revient vers l'est jusqu'à 10 heures et reste stationnaire pendant la nuit. L'amplitude de ces variations est de 13 à 15 minutes pendant l'été, mais elle tombe à 8 ou 10 pendant l'hiver.

Outre cela, les positions moyennes des divers mois ne sont point constantes, la déclinaison diminue et l'aiguille marche vers l'est du printemps au solstice d'été, mais elle repasse à l'ouest de cette dernière époque à la précédente : ces variations annuelles sont moins régulières que les mouvements diurnes. Enfin l'aiguille éprouve des perturbations accidentelles pendant les aurores boréales : nous ne nous y arrêterons pas.

Variations de l'inclinaison. — On a étudié également les variations de l'inclinaison, et à Paris les résultats ont été les suivants :

ANNÉES.	INCLINAISONS.	ANNÉES.	INCLINAISONS.
1671	75°.00'	1832	67°.40'
1775	72.15	1840	67.12
1798	69.51	1851	66.37
1806	69.12	1858	66.16
1811	68.50	1861	66.07
1820	68.20	1864	66.03

On voit que l'inclinaison a constamment diminué à Paris; il en a été de même à Londres.

L'intensité éprouve aussi des variations diurnes et annuelles. Les lois de ces variations ne sont pas connues; mais il est certain que des transformations magnétiques s'accomplissent dans le globe. Cela suffit pour exclure l'idée d'un aimant central permanent. Mais il n'est pas impossible qu'il y ait un courant équatorial allant de l'est à l'ouest, et que son intensité, ainsi que sa position, change de jour en jour, de siècle en siècle, par suite de causes qui ne nous sont pas encore connues.

CHAPITRE IV.

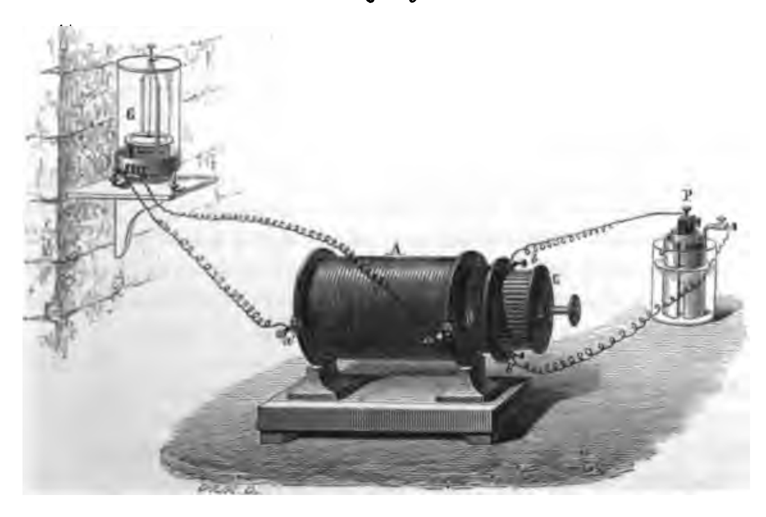
DE L'INDUCTION.

I. — INDUCTION DANS LES FILS. — LOI DE LENZ.

Lorsqu'un courant s'établit ou cesse de passer dans un conducteur, il développe par influence, dans tout circuit voisin, des courants qu'on a nommés *courants d'induction* ou *courants induits*. Ils ont été découverts par Faraday.

Induction par les bobines et les aimants. — La *fig.* 389 représente : 1° une bobine A composée d'un fil isolé très-fin, faisant un grand nombre

Fig. 389.



de tours sur un cylindre de carton, et dont les extrémités *a*, *a'* sont réunies par un galvanomètre G ; 2° une seconde bobine B parallèle à la première,

dans laquelle on peut l'introduire; elle est formée par un fil plus gros et moins long, dont on met les extrémités *b* et *b'* en relation avec une pile P; 3° un noyau central C qui entre dans la bobine B, comme B entre dans A, et qui est constitué par un faisceau de cylindres de fer doux.

1° Je suppose d'abord qu'on ait enlevé le noyau C, et qu'ensuite on introduise brusquement la bobine B dans A. On verra l'aiguille du galvanomètre se dévier et montrer qu'un courant se développe dans A, en sens inverse de celui qui circule dans B. Ce courant ne dure qu'un instant. On le nomme *courant commençant* ou *inverse*. On explique sa production d'une manière générale en disant que le courant direct exerce une influence sur le fil voisin, qu'il y développe un état électrique particulier, et que l'établissement de cet état se révèle par un mouvement électrique très-court, qui est le courant d'induction.

2° Après que l'aiguille est revenue au repos, on retire brusquement la bobine B, et l'aiguille est de nouveau déviée. Il y a dans A un nouveau courant, de même sens que le courant inducteur : on le nomme *courant finissant* ou *direct*. On l'explique en disant que le fil abandonne l'état électrique particulier où il avait été mis par le voisinage du courant inducteur et retourne à l'état naturel, ce qui donne lieu à un mouvement instantané inverse du premier.

3° Supposons que la bobine B soit placée dans A et que, sans changer sa position, on y fasse passer le courant de P. L'action de ce courant se fait brusquement sentir, comme si on approchait B, et l'on observe un courant d'induction dans A. Quand on interrompt le courant de B, c'est comme si on l'éloignait brusquement, et l'on détermine dans A un courant finissant.

4° Une bobine est un solénoïde, et un solénoïde n'est rien autre chose qu'un aimant; on peut donc remplacer le circuit inducteur B par un barreau aimanté. Quand on introduit celui-ci dans la bobine A, il y développe un courant inverse qui a le pôle austral à sa droite. Si l'on retire l'aimant, on observe l'induction finissante, directe, et le courant qui naît est parallèle à ceux de l'aimant; il a le pôle austral à sa gauche.

5° La bobine B, traversée par le courant de la pile, ayant été placée dans A, et le galvanomètre étant revenu au zéro, on introduit le noyau C: le fer doux s'aimante et produit une induction commençante ou inverse. En retirant ce noyau, on voit un courant direct se développer avec une très-grande intensité.

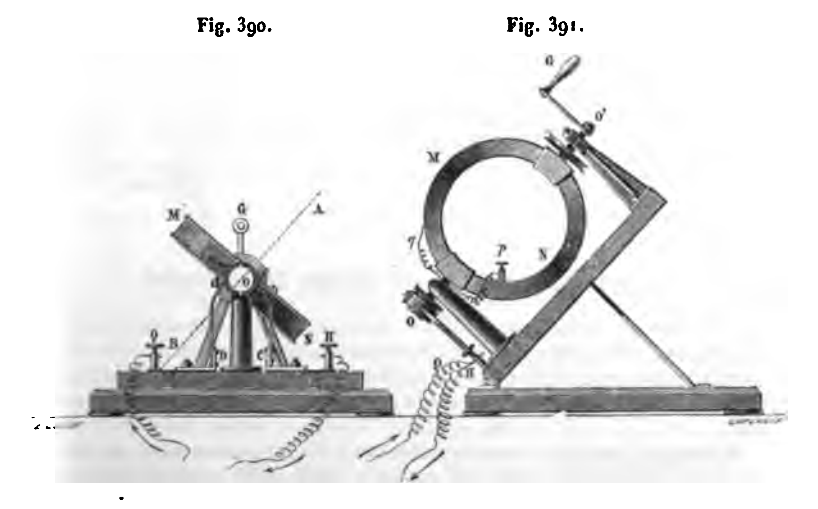
6° L'effet sera maximum si on laisse en présence A, B et le noyau C, et qu'on établisse le courant dans B, car, d'une part, ce courant agit sur A, et, de l'autre, il aimante C, et C développe une nouvelle induction

dans A. De même, lorsqu'on interrompt le courant de B, il se fait dans A un courant direct; d'autre part, le noyau C perd son magnétisme, et un nouveau courant direct s'ajoute au premier.

En resumé, il y a un courant *inverse* dans le circuit induit quand le courant ou l'aimant inducteur s'approche, augmente en intensité ou se forme. Il y a induction *directe* quand le courant ou l'aimant inducteur s'éloigne, diminue ou cesse.

Induction par la terre. — MN (*fig.* 390 et 391) est un anneau creusé d'une gorge dans laquelle s'enroule une spirale de fils de cuivre, et qu'une manivelle fait tourner autour d'un axe OO'. On peut placer cet axe horizontalement

Fig. 390. Fig. 391.



ou l'incliner par le moyen d'une charnière fixée à la base de l'appareil. Les deux extrémités p et q du fil aboutissent à un commutateur O (*fig.* 390) et deux languettes Dd, Cc pressent sur le contour de O. Si un courant de direction constante arrivait par QDd et sortait par cCH, il traverserait la spirale MN et changerait de sens à chaque demi-révolution; inversement, si un courant traversant MN change de sens à chaque demi-tour que fait l'axe, il prendra une direction constante dans le fil qui réunit les languettes, pourvu que celles-ci franchissent la ligne d'interruption du commutateur au moment précis où le sens du courant change dans MN.

Cela posé, plaçons l'axe OO' horizontalement de l'est à l'ouest (*fig.* 390), et mettons MN perpendiculairement à la direction AB de l'aiguille aimantée. Quand on commencera à faire tourner MN, on verra N s'éloigner et M se rapprocher du courant terrestre; il se produira des courants de l'ouest à l'est dans N, de l'est à l'ouest dans M. Tous deux s'ajouteront dans la bobine et dureront pendant une demi-révolution. Quand M aura pris la place de N et inverse-

ment, et que le mouvement continuera, le sens des courants changera dans l'anneau, mais restera constant dans le circuit extérieur, et un galvanomètre placé dans ce circuit éprouvera une déviation permanente. C'est ce que l'expérience montre. Mais si l'on incline l'axe OO' et qu'on le mette parallèlement à l'aiguille d'inclinaison (*fig.* 391), MN sera un circuit astatique par rapport à la terre ; quand on le fera tourner, on ne changera pas sa position par rapport à l'aimant terrestre et on ne développera aucun courant induit.

Loi de Lenz. — Au moment où nous avons rapproché les deux bobines A et B (*fig.* 389), les deux courants inducteur et induit étaient contraires ; donc, ils se repoussaient et tendaient à s'éloigner. De même, en éloignant les deux circuits, les deux courants étaient parallèles, s'attiraient et tendaient à se rapprocher. M. Lenz a généralisé cette remarque et énoncé la loi suivante qui porte son nom :

« Toutes les fois qu'on change la situation respective d'un courant et d'un circuit fermé, à l'état naturel, on développe dans celui-ci un courant d'induction qui réagit sur le courant inducteur pour produire un mouvement contraire, ou qui est inverse du courant qui produirait le même mouvement. »

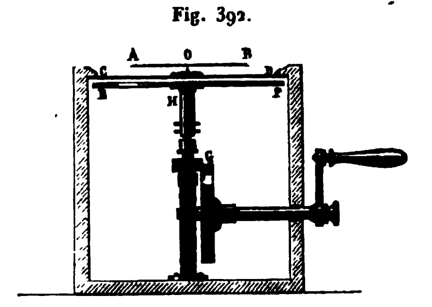
II. — INDUCTION DANS LES MASSES CONDUCTRICES.

La loi de Lenz explique de nombreux phénomènes que nous allons décrire.

1° Gambey découvrit, en 1824, qu'une aiguille aimantée qui oscille sous l'influence terrestre revient au repos beaucoup plus rapidement quand elle est suspendue au-dessus d'une masse considérable de cuivre que si elle en est éloignée.

2° Quelque temps après, Arago montra qu'en faisant tourner dans une boîte fermée, au moyen d'une manivelle, un disque métallique EF (*fig.* 392), on communique un mouvement de même sens à une aiguille AB suspendue au-dessus.

Fig. 392.



3° MM. Babbage et Herschel, au lieu de suspendre une aiguille au-dessus d'un

disque en mouvement, placèrent en équilibre sur un pivot central un disque de cuivre MN (*fig.* 393), au-dessus d'un aimant ACB qu'ils faisaient tourner sous la membrane FG. Cette expérience est l'inverse de la précédente. Le disque suit le mouvement de l'aimant.

Fig. 393.

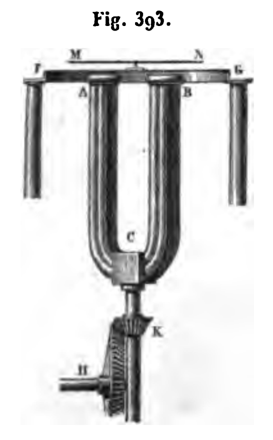


Fig. 394.



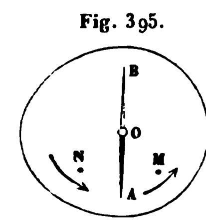
4° Enfin, de même que MM. Herschel et Babbage avaient renversé l'expérience d'Arago, Faraday renversa celle de Gambey. Il suspendit à un fil tordu B un cube de cuivre A entre les pôles C et D d'un électro-aimant énergique (*fig.* 394). Ce cube tourne d'abord rapidement, mais il s'arrête aussitôt qu'on aimante le fer doux, et il reprend son mouvement aussitôt qu'en ouvrant le circuit inducteur on ramène le fer à l'état naturel.

Ces expériences peuvent se résumer comme il suit :

« Toutes les fois qu'un aimant est en présence d'une masse métallique continue, et qu'on donne à l'aimant et au métal un déplacement relatif, il se produit une force qui tend à empêcher ce déplacement, c'est-à-dire à arrêter celui des deux corps que l'on a fait mouvoir, et à entraîner celui que l'on n'a pas mis en mouvement, comme s'il y avait un frottement entre eux. »

La cause du magnétisme de rotation doit être cherchée dans l'induction. En effet, l'aimant détermine des courants d'induction dans le disque, quand il se meut devant ce dernier, ou quand, inversement, le disque se déplace et que l'aimant reste immobile. Or, ces courants induits tendent à détruire par leur réaction le mouvement qui leur a donné naissance : ils agissent comme le ferait un frottement, et c'est précisément ce que nous venons de constater.

Fig. 395.



1° Soit AB (*fig.* 395) l'aiguille de Gambey et supposons que dans l'une de ses oscillations elle aille suivant les flèches de N en M. En s'approchant de la partie M, elle y développe des courants qui la repoussent, en s'éloignant de N elle en fait naître qui l'attirent, donc le disque agit pour la ramener au repos.

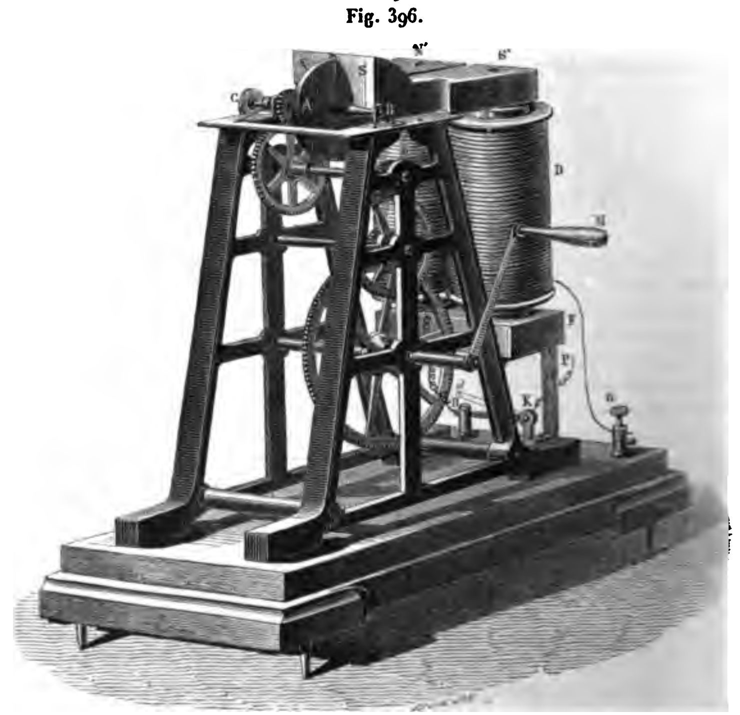
2° Si c'est la masse métallique qui tourne de N vers M, et que l'aimant soit fixe, il repoussera par induction les points tels que N, qui s'approchent de A, et attirera M, qui s'en éloigne : donc le mouvement du métal s'arrêtera, comme le montre l'expérience de Faraday.

3° MM. Herschel et Babbage font tourner l'aimant avec une force continue, alors le pôle A repousse avec une force continue les points M vers lesquels il marche, et attire les parties N dont il s'éloigne. Conséquemment, il entraîne le métal avec lui.

4° Enfin dans l'expérience d'Arago, c'est le disque qui reçoit un mouvement continu de N en M. N s'approche de A et le repousse, M s'en éloigne et l'attire, donc A se déplace dans le même sens que le disque.

Nous citerons encore une remarquable expérience de Foucault (*fig.* 396). Au

Fig. 396.



moyen d'une manivelle M et de roues dentées on imprime un rapide mouvement de rotation au disque de cuivre A entre les pôles N et S d'un électro-aimant. 1° Quand le courant ne passe pas dans celui-ci, le mouvement se produit sans résistance et se continue très-longtemps ; mais il s'arrête brusquement aussitôt qu'on lance un courant dans les bobines D et E. 2° On continue le

mouvement en agissant sur la manivelle et l'on constate qu'il faut vaincre une résistance passive et dépenser un travail considérable tant que l'aimantation persiste. 3° On reconnaît que le disque s'est échauffé quand ce travail a été continué pendant quelque temps. Voici l'explication de ces faits :

1° Le disque ayant une vitesse acquise, s'arrête au moment de l'aimantation : il s'arrête par la réaction des courants d'induction; c'est l'expérience de Faraday.

2° On continue le mouvement en faisant agir une force continue : alors les courants d'induction sont continus eux-mêmes; ils agissent pour produire un mouvement contraire à celui qui les détermine, c'est-à-dire une résistance; de là le travail qu'il est nécessaire de dépenser.

3° Il y a de la chaleur produite, parce que les courants d'induction échauffent leurs conducteurs.

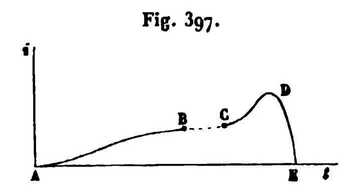
Si l'on ne tient pas compte de l'électricité qui est l'intermédiaire de ces actions, on peut se contenter de dire que le travail s'est transformé en chaleur.

III. — CONTRE-COURANT, EXTRA-COURANT.

Induction d'un courant sur lui-même. — Quand, après avoir mis en contact les deux rhéophores d'une pile, on vient à les séparer, on voit apparaître une étincelle de rupture. Elle est presque insensible si le circuit extérieur est formé par un fil court; elle est grande, vive et bruyante quand le fil est enroulé sur des bobines en tours nombreux et rapprochés. Lorsqu'on tient dans chaque main les deux rhéophores, on reçoit à la rupture une commotion très-forte. Cela prouve que le courant, qui a traversé les bobines, éprouve, quand on l'interrompt, un renforcement subit qui lui permet de franchir, sous forme d'étincelle, la distance très-petite qui sépare les deux rhéophores ou les muscles du corps humain au moment de l'interruption. Voici comment Faraday a expliqué ce fait.

Considérons en particulier deux portions voisines et parallèles du fil enroulé sur une bobine. Au moment où le courant s'établit dans l'une, il développera dans l'autre un courant induit inverse, qui diminuera l'intensité du premier puisqu'il marche dans le même circuit : c'est le *contre-courant*. Le courant total commencera donc par être très-faible, puis il croîtra comme les ordonnées d'une courbe AB (*fig.* 397); ensuite il prendra une intensité constante de B en C.

Fig. 397.



Si l'on vient à rompre le circuit, chaque spire agit de nouveau sur ses voisines pour y faire naître un courant induit direct qui s'ajoute au cou-

dans toute la hauteur de l'appareil, et dont on prenait la moyenne. Pour obtenir la pression, on mesurait la différence de hauteur h des deux baromètres au moyen d'une règle divisée contre laquelle ils étaient appuyés. Mais, comme le mercure de ces baromètres est à une température t, il fallait ramener la dépression observée à zéro, c'est-à-dire diviser h par $(1 + mt)$, m étant le coefficient de dilatation absolue du mercure. On faisait ces observations en élevant progressivement la température jusqu'au voisinage de 100 degrés. A ce moment, la tension et la dépression h approchant de 760 millimètres, les mesures ne pouvaient plus se continuer.

M. Regnault a reconnu que cette méthode ne peut s'appliquer qu'à des températures peu élevées, il a remplacé l'appareil de Dalton par celui de la *fig.* 176 qui permet de viser les sommets A et A' des deux colonnes de mercure au cathétomètre à travers une fenêtre de glace.

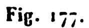
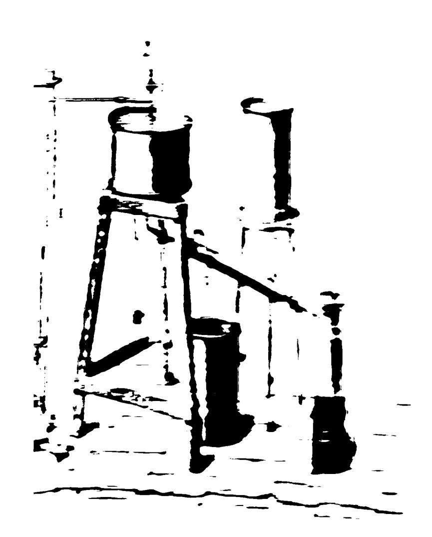


Fig. 177.



II. *Au-dessous de zéro.* — La méthode de Dalton, qui suffit pour les températures comprises entre 0 et 50 degrés, n'aurait pu servir au-dessous de zéro sans une heureuse modification introduite par Gay-Lussac. Dans son appareil (*fig.* 177), il y a encore deux baromètres voisins AB et CD; le second CD, qui contient l'eau, se recourbe à son sommet, se termine par un ballon E et plonge dans un mélange réfrigérant. La tension définitive qui s'établit dans ce tube étant celle qui correspond à la température de ce mélange réfrigérant, l'appareil est dans les mêmes conditions que si la chambre à vapeur tout entière était refroidie; et comme les deux tubes sont placés dans l'air, on mesure aisément au cathétomètre la différence des niveaux.

III. *A des températures quelconques.* — Après un travail considérable exécuté, en 1829, par Dulong et Arago, M. Regnault détermina les forces élastiques de la vapeur d'eau par une méthode due à Dalton, et qui repose sur ce principe, déjà indiqué précédemment, que la température de l'ébullition d'un liqu[illegible] élastique de sa vapeur est égale à [illegible] qu'il supporte. Conséquemment, [illegible] bouillir l'eau dans une enceinte fermée, sous des pressions qu[illegible]

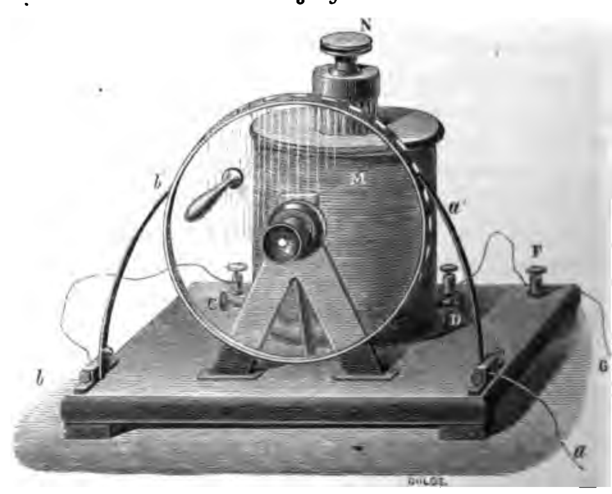


rant principal et produit un renforcement final CDE assez intense pour franchir sous forme d'étincelle la couche d'air interposée entre les conducteurs qu'on sépare : c'est ce qu'on nomme l'*extra-courant*. Il y a donc trois périodes successives : la première, d'établissement, pendant laquelle l'intensité croît; la deuxième, d'état permanent; la troisième, finale, caractérisée par une brusque augmentation d'intensité, comme si la force électromotrice croissait.

Supposons que les deux bouts du conducteur, au lieu d'être isolés, soient tenus dans les deux mains ou réunis par un conducteur très-résistant. Au moment où, après les avoir laissés en contact pendant quelque temps, on vient à les éloigner l'un de l'autre, le courant principal éprouve un grand affaiblissement, puisqu'une résistance très-grande lui est opposée tout à coup. Alors l'induction finissante agit pour produire le renforcement CDE, qui se partage en deux courants dérivés, l'un qui donne une étincelle faible ou nulle, l'autre qui parcourt le corps humain ou le conducteur résistant qui réunit les deux extrémités.

On peut reproduire à des intervalles très-rapprochés cet extra-courant à l'aide de l'appareil suivant (*fig.* 398). M est une roue de verre qui porte

Fig. 398.



sur son contour une bande de cuivre, continue sur un bord et dentée sur l'autre. Une languette a' appuie sur ces dents, une seconde b' sur la bande continue. De cette façon, tout courant qui ira de a' à b' sera alter-

nativement établi ou interrompu quand on fera tourner la roue; on la nomme, à cause de cela, *rhéotome*. Cela étant, un courant partant de G traverse une bobine, revient au rhéotome de C en bb' et à $a'a$. Si l'on place en a et b deux fils terminés par des poignées et qu'on prenne celles-ci dans les deux mains, l'extra-courant se produit au moment où le rhéotome ouvre le circuit et comme, pour retourner au pôle négatif, il ne peut pas passer à travers la roue, il traverse le corps, et l'on éprouve une vive commotion à chaque interruption.

IV. — QUANTITÉS ET TENSIONS DES COURANTS INDUITS.

Nous avons déjà supposé que le voisinage d'un courant inducteur détermine dans un fil voisin un nouvel état d'équilibre des fluides électriques, qui doit persister pendant tout le temps que dure l'action qui le produit. Si cette hypothèse est fondée, il faut que l'établissement de cet état nouveau se révèle par un mouvement des fluides dans le fil, c'est-à-dire par un courant d'induction commençante; au moment où l'action finit, le fil, revenant à l'état naturel, doit de toute nécessité être le siége d'un mouvement contraire, c'est-à-dire d'un courant d'induction finissante opposé au premier; et puisque la deuxième période défait ce que la première avait fait, *les quantités d'électricité mises en circulation doivent être égales dans les deux courants.*

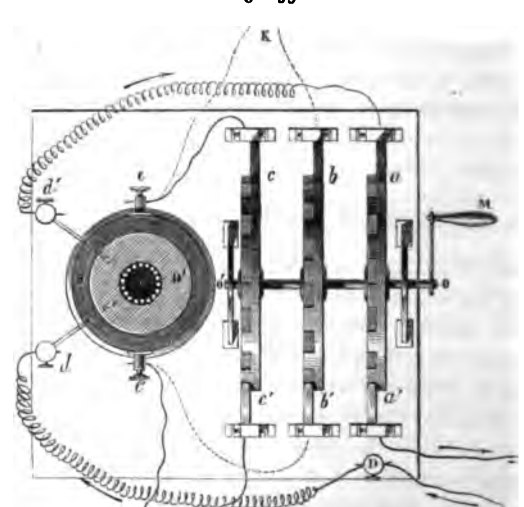
Pour prouver qu'il en est ainsi, on emploie l'appareil de Masson et Breguet (*fig.* 399), qui se compose d'une bobine double; la bobine intérieure D' reçoit le courant d'une pile, qu'on peut interrompre par un rhéotome aa'; la bobine extérieure F est mise en communication par les fils cK, cH, avec un voltamètre rempli de sulfate de cuivre, lequel est traversé ainsi alternativement par les deux sortes de courants d'induction, direct et inverse. Or on reconnaît qu'il n'y a aucune décomposition du sel, c'est-à-dire que les deux sortes de courants détruisent leurs effets, ou qu'ils contiennent la même quantité d'électricité.

L'induction se produit à la fois et également sur tous les éléments du circuit; par suite, la quantité q d'électricité mise en mouvement dans le courant direct ou inverse, est proportionnelle à la longueur, c'est-à-dire à la résistance R de ce circuit. Elle est également proportionnelle à l'intensité I du courant inducteur. On peut donc écrire, en représentant par K une fonction de la distance des deux fils,

$$q = \mathrm{KIR}.$$

Mais de ce que les courants direct et inverse contiennent des quantités q d'électricité égales, il ne faut pas conclure que leurs intensités soient

Fig. 399.



les mêmes : celles-ci dépendent du temps pendant lequel durent ces courants.

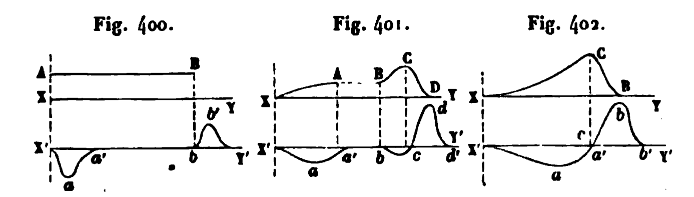
Supposons que d'abord on rapproche le fil induit du courant inducteur. les deux états d'équilibre du fil induit ne dépendent que de ses positions initiale et finale et nullement du temps t qu'il met pour passer de la première à la seconde; donc la quantité d'électricité q qui est contenue dans le courant induit est constante; mais elle se mesure par le produit du temps par l'intensité moyenne i de ce courant, et l'on a $q = it$. L'intensité moyenne est donc en raison inverse de t.

Inversement, si nous ramenons le fil induit à sa première position, il retourne à son état primitif; la même quantité q d'électricité circule en sens opposé; le courant qui manifeste ce retour aux conditions initiales dure pendant le temps t' que ce retour met à s'accomplir; il prend une intensité i', et l'on a $q = i't'$. On pourra donc faire à volonté que le courant inverse ou le courant direct ait une intensité grande ou petite, il suffira de faire que sa durée soit petite ou grande.

Les mêmes raisonnements s'appliquent à l'induction produite dans le fil induit par l'établissement et la cessation du courant dans un circuit inducteur voisin, et les intensités des deux courants inverse et direct seront en raison inverse de leurs durées *t* et *t'*. Or on va montrer que ces durées sont inégales à cause des extra-courants qui se produisent au moment de la fermeture et de la rupture du circuit.

En effet, supposons (*fig.* 400) que dans le fil inducteur XY le courant s'établisse brusquement en prenant instantanément son intensité XA, la conservant pendant toute sa durée et la perdant brusquement, de sorte qu'en prenant les temps pour abscisses, elle puisse se représenter par les ordonnées de la droite AB ; les courants d'induction dans le fil X'Y' seront, l'un inverse X'*aa'* en commençant, l'autre direct *bb'*Y' en finissant, et leur durée sera vraisemblablement peu différente.

Fig. 400. Fig. 401. Fig. 402.



Mais si, comme cela a lieu surtout dans les circuits repliés en spirale et très-longs, le courant inducteur prend peu à peu son intensité constante de X en A (*fig.* 401), le courant induit inverse X'*aa'* dure pendant tout le temps *t* que cette intensité croît, et ce temps est d'autant plus grand que le fil inducteur est plus long. Au moment de la rupture du circuit XY, l'effet de l'extra-courant est d'augmenter d'abord l'intensité de B en C et de la faire décroître ensuite très-brusquement de C en D. Il en résulte une induction double dans X'Y', c'est-à-dire un courant inverse *bc*, et un courant direct *cdd'*. Celui-ci contient une quantité d'électricité égale à celle que les deux autres X'*aa'* et *bc* possèdent à eux deux ; mais sa durée *t'* est notablement plus petite que la somme des leurs.

Enfin, si le courant inducteur ne reste établi que pendant un temps très-court, ce qui a lieu quand on emploie des rhéotomes, il croît peu à peu jusqu'à un maximum C(*fig.* 402), et cesse brusquement de C en B. Dans ce cas, les deux courants inverses de la figure précédente se réunissent en un seul X'*ac*, qui dure pendant le même temps *t* que le courant inducteur, et qui a une faible intensité, tandis que le courant direct *a'bb'* conserve une durée *t'* toujours très-courte et prend une très grande intensité. Cela conduit à cette première conclusion que *le courant d'in-*

duction finissante doit avoir une intensité plus grande que le courant inverse d'induction commençante.

La quantité d'électricité q est, en général, égale à KIR, et pour le courant inverse elle est représentée par it : on a donc

$$\mathrm{KIR} = it.$$

Or, pendant le temps t, le circuit induit se trouve dans le même état que si chacun de ses éléments était un couple de pile, et lui-même une pile d'une infinité de couples, ayant une force électromotrice A et une résistance R; donc

$$i = \frac{\mathrm{A}}{\mathrm{R}},$$

et, par suite,

$$\mathrm{KIR} = \frac{\mathrm{A}}{\mathrm{R}}t, \quad \mathrm{A} = \frac{\mathrm{KIR}^2}{t}.$$

On a de même pour le courant direct

$$\mathrm{A}' = \frac{\mathrm{KIR}^2}{t'},$$

ce qui veut dire que la force électromotrice de chacun des deux courants induits est *proportionnelle à l'intensité du courant inducteur, au carré de la résistance de la bobine induite, et en raison inverse du temps pendant lequel il dure.*

Et puisque le temps t' du courant direct est toujours très-petit et demeure vraisemblablement le même, quel que soit R, tandis que la durée t du courant inverse augmente avec le nombre des spires et avec R, *la force électromotrice* A' *du courant direct est toujours plus grande que* A, *celle du courant inverse, et le rapport de* A' *à* A, *qui est égal à celui de t à t', augmente avec la longueur du fil induit.*

Nous avons jusqu'à présent supposé que le circuit induit était fermé. S'il était ouvert, l'induction agirait toujours et de la même manière; seulement au lieu de produire un courant, elle ferait naître aux deux extrémités une différence de tension qui serait proportionnelle à A ou à A' : d'où il suit qu'elle serait proportionnelle à IR^2, en raison inverse de t ou de t', et par suite qu'elle serait plus grande pour le courant direct que pour le courant inverse. Par conséquent, si l'on recueille exclusivement au moyen d'un rhéotome les courants directs ou les courants inverses, *les deux extrémités du fil induit produiront tous les effets des conducteurs opposés d'une machine de Nairne, avec une intensité qui dependra de* I *et de* R, *et qui sera plus grande pour les courants directs que pour les courants inverses.*

C'est ce que Masson et Breguet ont démontré les premiers, en recueillant les courants directs en K par le rhéotome $b\,b'$ (*fig.* 399) et les courants inverses en H par $c\,c'$; les premiers donnaient des étincelles et des lueurs dans le vide, les seconds n'en produisaient pas.

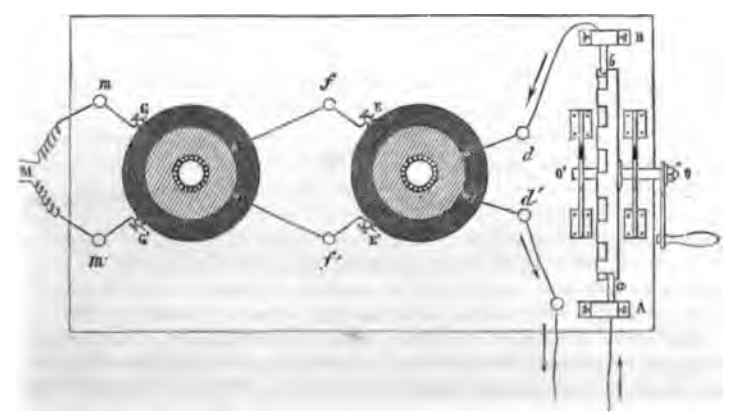
Si les deux extrémités du fil induit HK étaient séparées par une couche d'air très-mince, les deux courants pourraient la franchir sous forme d'étincelle; si elle devenait plus grande, le courant inverse ne la pourrait plus traverser, mais le

courant direct le ferait : c'est en effet ce que l'expérience confirme. Quand on emploie une machine analogue à celle de la *fig.* 399, et qu'on fait passer le courant induit d'abord à travers une couche d'air convenable, ensuite dans un voltamètre contenant du sulfate de cuivre, il se fait une décomposition dans le sens du courant direct, ce qui prouve que le courant inverse est annulé.

V. — INDUCTIONS DE DIVERS ORDRES.

Faisons passer le courant d'une pile d'abord à travers un rhéotome *ab*, destiné à l'interrompre et à le transmettre alternativement (*fig.* 403), ensuite dans une bobine intérieure *dd'*. Il déterminera dans une bobine extérieure EE' des courants induits inverses quand il commencera, et directs quand il

Fig. 403.

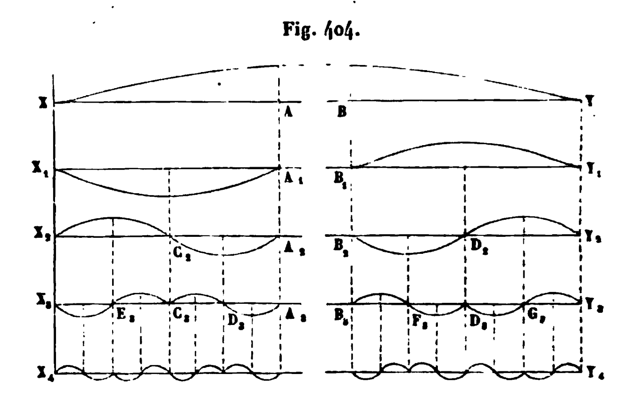


finira. Ces courants sont dits courants du premier ordre. Dirigeons-les ensuite, comme précédemment le courant de la pile, dans une deuxième bobine intérieure par les fils *f*, *f'*, ils engendreront dans la bobine enveloppante GG' d'autres courants induits successifs qui sont du deuxième ordre. En multipliant le nombre des appareils, et les reliant de l'un à l'autre comme les deux premiers, on produira d'autres courants du 3e, 4e, ..., n^e ordre, dans la 3e, 4e, ..., n^e bobine extérieure.

Représentons (*fig.* 404), par les ordonnées d'une courbe XY les intensités de l'un des courants inducteurs envoyés par le rhéotome; tant qu'elles augmenteront, elles donneront dans le fil du premier ordre X_1Y_1 un courant inverse X_1A_1; quand elles diminueront, elles en produiront un autre B_1Y_1 qui sera direct. Les deux courants X_1A_1, B_1Y_1 vont maintenant agir sur le fil du deuxième ordre X_2Y_2, comme XY agissait sur X_1Y_1, le premier en donnera deux X_2C_2, C_2A_2, le second en produira deux autres B_2D_2, D_2Y_2, et en répétant

les mêmes raisonnements pour le troisième et le quatrième ordre, on arrive aux représentations graphiques dessinées en X_3Y_3 et en X_4Y_4. Chaque courant

Fig. 404.



inducteur doit donc développer 2 courants du premier ordre, $4 = 2^2$ du second, $8 = 2^3$ du troisième, et enfin 2^n du n^e ordre.

Quel que soit cet ordre, la loi de l'égalite des quantités d'électricite qui circulent dans un sens ou dans l'autre subsiste comme précédemment, car dans chaque bobine intérieure il y a pendant un temps donné le même nombre de courants dans les deux directions, et chacun d'eux détermine dans le fil qui l'enveloppe deux courants qui contiennent la même quantité d'électricité et qui circulent en sens opposé; d'où il suit qu'en recueillant en M (*fig.* 403), à travers du sulfate de cuivre tous les courants qui sortent de la dernière bobine, on ne doit avoir aucune décomposition, ce qui se constate en effet.

Mais si l'on fait passer ces courants à travers un voltamètre à eau, les gaz se dégagent au passage de chacun d'eux, et finalement on trouve de l'oxygène et de l'hydrogène dans chaque cloche.

Les courants n'ont pas tous la même intensité. Or si l'on interpose dans leur trajet un petit intervalle d'air que l'électricité est obligée de franchir sous forme d'étincelle, il arrête le courant le moins intense et laisse passer le plus fort. celui-ci produit seul la décomposition de l'eau, il n'y a plus qu'une espèce de gaz à chaque pôle, et le sens du courant qui a passé est indiqué par le tableau suivant :

COURANT INDUCTEUR.	COURANTS INDUITS.					
	1er ordre.	2ᵉ ordre.	3ᵉ ordre.	. . .	$2n^e$ ordre.	$(2n+1)^e$ ordre
Direct.	Direct.	Inverse.	Direct.	. . .	Inverse.	Direct.

Induction par l'électricité statique. — La décharge d'une batterie électrique étant un véritable courant, toute bobine soumise à son influence doit être traversée par deux courants, l'un inverse, d'induction commençante, l'autre direct, d'induction finissante, tous deux égaux en quantité et probablement différents en tension.

Verdet chargeait avec une machine électrique la batterie A (*fig.* 405), qui était posée sur un sol conducteur et munie du micromètre de Lane à l'extrémité d'une tige isolante, de façon qu'elle se déchargeait d'elle-même aussitôt qu'elle atteignait une tension suffisante ; alors elle produisait un courant qui

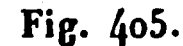
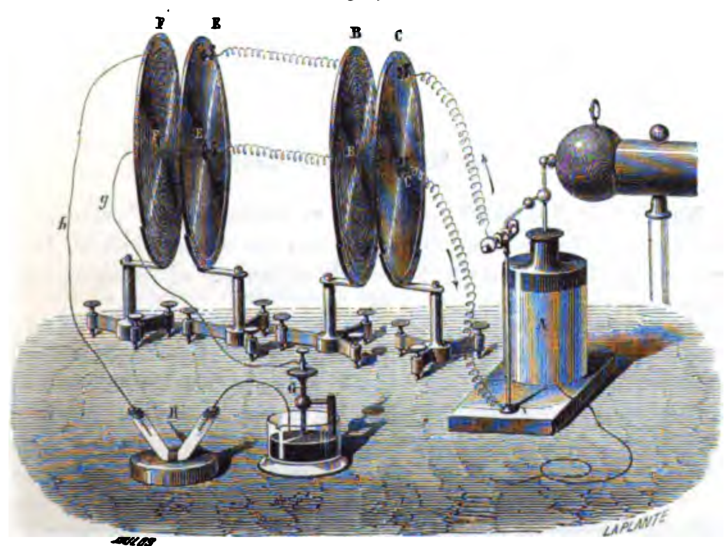


Fig. 405.



circulait en CC, dans une spirale de fils de cuivre isolés à la gomme laque et appliqués sur un disque de verre. Cette spirale développait les phénomènes d'induction dans une autre, BB, qui était placée en regard et tout près d'elle. BB communiquait avec une troisième spirale EE, qui à son tour induisait la quatrième FF.

En faisant passer les courants de la dernière bobine dans un voltamètre, il ne se produit aucune décomposition, ce qui prouve que les quantités d'électricité mises en mouvement dans les deux sont égales. Mais si l'on met dans le trajet des fils *g* et *h* un vase *g* rempli de mercure et où les courants arrivent par une vis relevée au-dessus du niveau, ils traversent un intervalle d'air sous forme d'étincelles, et ceux qui sont les moins intenses sont arrêtés. Les lois sont les mêmes que pour les courants des piles.

CHAPITRE V.

ÉLECTRO-GÉNÉRATEURS.

I. — LA MACHINE DE RUHMKORFF.

Machine de Ruhmkorff. — Masson et Breguet étaient parvenus à produire des effets notables de tension avec les courants induits. Leur machine, perfectionnée par M. Ruhmkorff, est devenue un des instruments les plus précieux de la physique (*fig.* 406).

Fig. 406.



Au centre de l'appareil, en O, se trouve un faisceau de fils de fer doux, la bobine inductrice enveloppe ce faisceau, elle est contenue dans un cylindre isolant de caoutchouc durci, représenté par un cercle ponctué. Elle est composée d'un fil de 2 millimètres à 2^{mm},5 de diamètre, faisant environ 300 tours, et dont les extrémités communiquent, l'une en + M, l'autre en A. La bobine induite est enroulée sur le cylindre isolant; elle est con-

stituée par un fil de $\frac{1}{4}$ de millimètre de diamètre qui fait au moins 30 000 tours, et qui est très-soigneusement isolé au milieu d'un mastic de gomme laque fondue. Les deux extrémités de ce fil sortent de l'appareil en K et en L et communiquent à deux poupées isolées K' et L'.

Le circuit inducteur est alternativement ouvert et fermé par le rhéotome suivant, qui est dû à M. de la Rive. Le courant partant de + M entre dans la bobine; il sort par A, arrive à la poupée B, passe par un levier très-mobile BC jusqu'à un marteau C qui repose sur une enclume D, continue sa route du marteau à l'enclume, de D à la poupée F, et retourne au pôle négatif M de la pile. Mais à peine a-t-il commencé à circuler, que les fils de fer O s'aimantent et soulèvent le marteau, ce qui établit une interruption entre C et D. Immédiatement après, le fer se désaimante, le marteau retombe et rétablit la communication. On peut rendre ces alternatives plus ou moins rapides en soulevant ou en abaissant par une vis G la lame élastique sur laquelle se pose l'enclume.

La bobine induite est traversée par des courants directs toutes les fois que le marteau se soulève, et par des courants inverses quand il s'abaisse; les uns et les autres contiennent la même quantité d'électricité, et comme la bobine est très-résistante, ils ont une force électromotrice considérable. Mais, ainsi que nous l'avons précédemment démontré, la tension des premiers l'emportera de beaucoup sur celle des seconds. C'est ce que vont nous expliquer plusieurs phénomènes.

L'aiguille d'un galvanomètre placé en K"L" sera alternativement sollicitée en sens opposé par les deux quantités égales d'électricité dont les effets s'annuleraient si les tensions et les durées étaient égales; comme elles ne le sont pas, il y a une faible déviation dans le sens des courants directs.

Laissons entre K" et L" un intervalle d'air d'abord très-petit, que nous augmenterons progressivement. Les courants directs le franchiront plus aisément que les courants inverses, ils prendront une prédominance de plus en plus marquée, et, finalement, passeront seuls. Alors les effets galvanométrique et chimique vont en croissant dans le sens des courants directs, l'interruption faisant l'effet d'une espèce de filtre qui arrête les courants inverses, et l'on voit entre les deux points K" et L" jaillir une série d'étincelles, comme si l'on opérait avec la machine électrique.

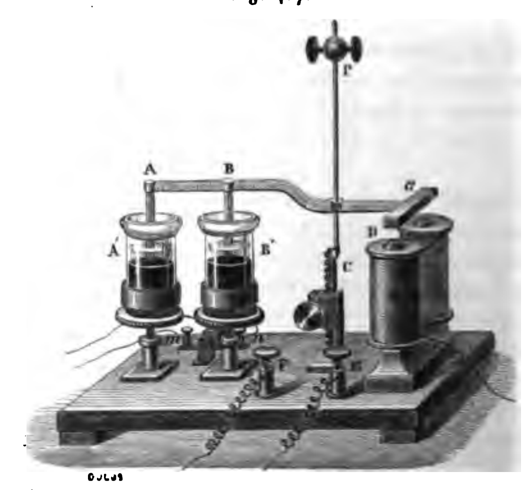
Au moment où le marteau se soulève et que le courant inducteur est interrompu, l'extra-courant passe entre le marteau et l'enclume sous forme d'une étincelle. C'est comme si la durée du courant inducteur était prolongée. Il s'ensuit que la durée du courant induit direct est également prolongée et que sa tension est affaiblie. Pour y remédier, M. Fizeau a

disposé, dans la base même de l'appareil, un condensateur de très-grande surface, formé par une lame de taffetas repliée qui sépare deux feuilles d'étain qui en sont les armatures (*fig.* 406) : l'une, marquée + + ..., est de communication avec la poupée B ; l'autre, désignée par — — ..., est reliée à F. Lorsque le marteau se soulève, l'extra-courant se produit et se répand dans le condensateur qu'il charge ; l'électricité positive s'écoule par AB*b* sur les armatures + + ..., et le fluide négatif par DF*f* sur les lames — — .... Dès lors l'étincelle d'induction diminue, puisque les fluides qui la produisaient trouvent un grand espace où ils se distribuent.

A peine sont-ils accumulés sur le condensateur, qu'ils tendent à se recombiner en suivant le conducteur *b*BA, puis la bobine inductrice, puis la pile M, puis enfin F*f* et les lames — — ... ; il en résulte un courant opposé à celui de la pile et qui détruit brusquement l'aimantation du fer doux, ce qui fait que le courant induit direct est moins prolongé et, par conséquent, plus intense. Les étincelles augmentent jusqu'à 8 ou 10 millimètres.

Interrupteur de Foucault. — A mesure qu'on a perfectionné les procédés de construction et qu'on a pu produire des machines plus énergiques, il est devenu nécessaire de remplacer le rhéotome de M. de la

Fig. 407.



Rive par un appareil, dû à Foucault (*fig.* 408), où l'interruption est produite par une pointe qui plonge dans un godet contenant du mercure

sous une couche d'alcool, et qui alternativement pénètre dans le mercure ou en sort. Une lame de cuivre PC (*fig.* 407), qu'on peut soulever ou abaisser par une crémaillère, fait des oscillations plus ou moins rapides, suivant qu'on fixe un contre-poids P à diverses hauteurs. Elle entraîne une tige *a*BA, qui porte en *a* un fer doux placé au-dessus d'un électro-aimant D, et en BB' une pointe de platine. Celle-ci plonge dans un godet de verre à fond métallique, qui contient du mercure et une couche d'alcool superposée; elle est baignée par l'alcool et affleure à la surface du mercure. Une petite pile locale envoie un courant dans le mercure du godet, de là dans le conducteur B'BC, puis dans l'électro-aimant. Celui-ci s'aimante, attire le contact *a*, soulève la pointe B', qui sort du mercure et interrompt le courant; alors la lame PC ramène par son élasticité la pointe B' dans le mercure et ferme de nouveau le circuit; de là résulte un mouvement continuel d'oscillation.

Le courant inducteur, qui vient d'une autre pile, passe par un commutateur *mn* et par un godet A', qui est disposé comme le précédent et dans lequel plonge une pointe AA' portée par la même tige AB*a*. Si cette pointe est relevée, le courant est interrompu; si elle est abaissée, le courant passe, vient en C, en F, traverse la bobine inductrice, revient au commutateur et de là à la pile.

II. — ÉTINCELLE D'INDUCTION.

Toutes les fois que le courant inducteur commence à passer, il y a un courant inverse dans la bobine induite, et les deux extrémités Q et Q' du fil se chargent, l'une positivement, l'autre négativement. Leur tension est faible, et s'il y a entre les deux une interruption, elle n'est pas franchie et les électricités séparées se recombinent alors dans l'étendue de la bobine. Un instant après l'inducteur est interrompu, le courant induit direct prend naissance, et il donne aux extrémités Q et Q' des tensions opposées aux précédentes, beaucoup plus considérables et suffisantes pour produire l'étincelle d'induction entre deux conducteurs : elle peut atteindre 40 à 50 centimètres de longueur.

Quand on interpose dans le trajet une grande jarre AB (*fig.* 408), l'électricité positive commence par s'accumuler sur l'une des armatures, et la négative sur l'autre armature B, et toutes deux se réunissent ensuite à travers l'interruption OD de l'excitateur universel quand la jarre se dé-

charge. Les étincelles obtenues de cette manière sont plus nourries et moins longues, elles détonent avec un grand bruit.

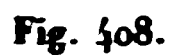
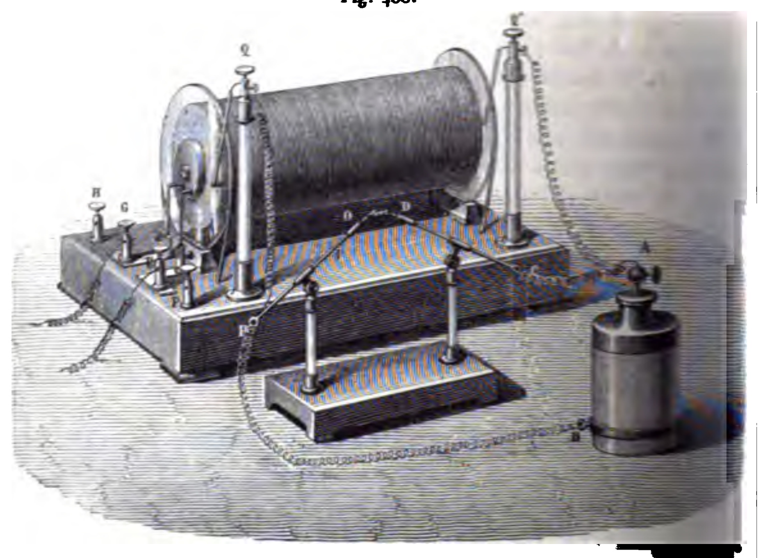
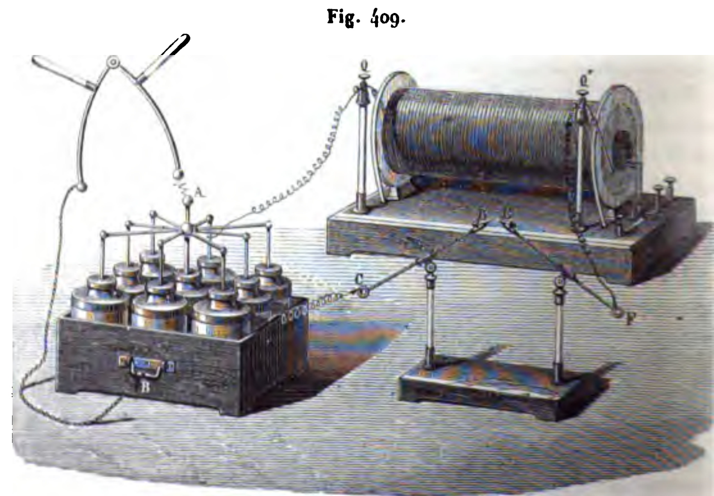


Fig. 408.



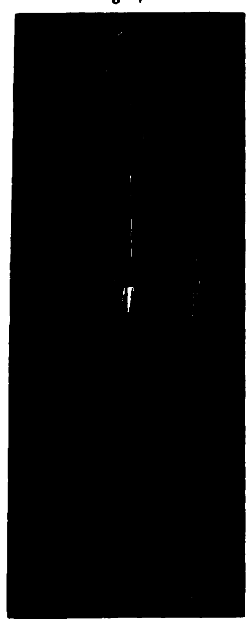
On peut aussi disposer l'appareil comme dans la *fig*. 409, [illegible]

Fig. 409.



extrémités Q et Q' en communication avec les armatures d'une batterie AB, et interrompre le circuit en DE. Dans ce cas, l'extrémité positive Q envoie son fluide dans la batterie, et le fluide positif de l'armature extérieure, passant en CD, vient à travers l'intervalle DE recombiner l'électricité neutre dans la bobine. La batterie se charge aussi fort et plus rapidement qu'avec une machine électrique.

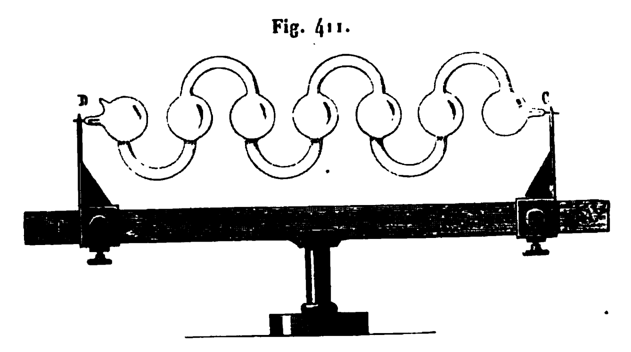
Fig. 410.



Stratifications. — Toutes les fois qu'on fait passer la décharge de la machine de Ruhmkorff dans un espace vide, elle donne une lueur continue (*fig.* 410). De la pointe positive A on voit partir une gerbe rouge qui occupe presque toute l'étendue de l'œuf, et qui offre auprès de A un maximum d'éclat. La pointe négative C ne donne point de gerbe, elle est entourée de trois couches de lumière d'un bleu violet, qui ne s'étalent pas, et il y a toujours un espace obscur entre la gerbe et la boule C. Cette apparence change quand on introduit dans l'air raréfié des vapeurs d'alcool, d'éther, de sulfure de carbone, etc. Dans ce cas, la gerbe se divise en couches perpendiculaires à AC, qui sont alternativement lumineuses et obscures, et qui font paraître la lumière comme stratifiée.

L'expérience peut se faire avec des tubes dits de *Geissler* (*fig.* 411),

Fig. 411.



formés par des boules et des conduits étroits, que la lumière illumine, en présentant les mêmes particularités de stratification. Il est aujourd'hui dé-

montré que ces courbes se retrouvent dans toutes les décharges électriques. On ignore la cause de ce brillant phénomène.

Composition de l'étincelle d'induction. — L'étincelle donnée par ces machines est composée d'un trait de feu brillant qui en occupe l'axe, et d'une auréole extérieure rouge-orangé, beaucoup moins lumineuse. Le trait de feu est instantané, mais l'auréole dure pendant un temps appréciable. Dès lors, celle-ci devra contenir la presque totalité de l'électricité qui passe. C'est pour cela que l'on nomme l'auréole la *décharge de quantité*, le trait la *décharge de tension*.

Le trait perce une feuille de papier sans l'échauffer, comme le fait l'étincelle des machines électriques ; mais l'auréole l'échauffe jusqu'à l'enflammer.

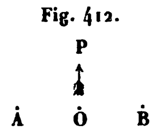
Une action mécanique quelconque ne produit aucun effet sur le trait instantané, mais elle agit sur l'auréole, parce qu'elle dure. Un courant d'air rapide entraîne l'auréole et la sépare du trait ; si l'on fait éclater l'étincelle entre deux veines liquides ou entre deux conducteurs animés d'un mouvement rapide et commun, on voit l'auréole en retard du trait.

Quand on condense la décharge totale dans une batterie (*fig.* 408) avant de la laisser éclater dans l'air, toute l'électricité, soit celle de l'auréole, soit celle du trait, commence par se condenser dans la batterie, qui ensuite se décharge, suivant les conditions ordinaires, en un seul trait de feu qui est instantané, et conséquemment plus large et plus brillant.

Actions magnétiques. — La décharge d'induction, tout aussi bien que l'arc voltaïque, est formée de courants qui circulent à travers l'air ; ils éprouvent les mêmes actions mécaniques que des conducteurs solides.

Soient (*fig.* 412) A et B deux pôles d'aimant, et O un courant vertical. S'il

Fig. 412.



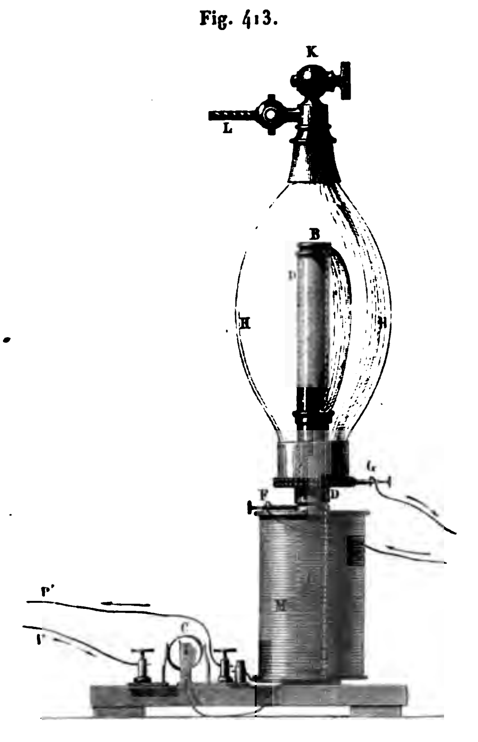
regarde A, il a sa droite vers P ; s'il est tourné vers B, c'est sa gauche qui est dirigée en P. Or entre ces deux pôles il est dans la même situation que les courants de la roue de Barlow, et il doit être chassé vers sa droite par A, vers sa gauche par B, c'est-à-dire dans le sens de la flèche P.

En effet, M. Quet a vu l'arc voltaïque, placé entre les pôles A et B d'un électro-aimant très-énergique, se dévier vers P en prenant la forme d'un dard de chalumeau. Quand on remplace cet arc par la décharge d'induction, le trait de feu instantané n'est point influencé, mais la lueur est chassée dans la direction de P, en s'étalant sous forme d'un éventail rouge.

Dans le vide, le trait disparaît, et l'étincelle se transforme en une gerbe lu-

mineuse qui est soumise à l'action magnétique. Pour le démontrer, M. de la Rive a fait disposer, dans l'œuf électrique (*fig.* 413), un morceau de fer doux AB entouré à sa base d'une bobine M et isolé à son sommet par un tube de verre DD. Au moyen d'une pile PP' et de la bobine M on peut l'aimanter, et par une machine de Ruhmkorff faire passer la décharge du sommet B au milieu de cet électro-aimant par les fils F, G. Elle s'étale en gerbe, et puisque c'est un courant, elle doit tourner autour de l'aimant : c'est en effet ce que l'expérience montre, et le sens de la rotation change avec celui de l'aimantation du fer doux. On peut aussi faire éclater la décharge entre B et un cercle concentrique horizontal, disposé dans l'œuf à une certaine distance de B. On voit alors une lueur rayonnante, qui a la plus grande analogie avec celle des aurores boréales, et qui, comme celles-ci, possède un mouvement de rotation.

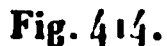
Fig. 413.

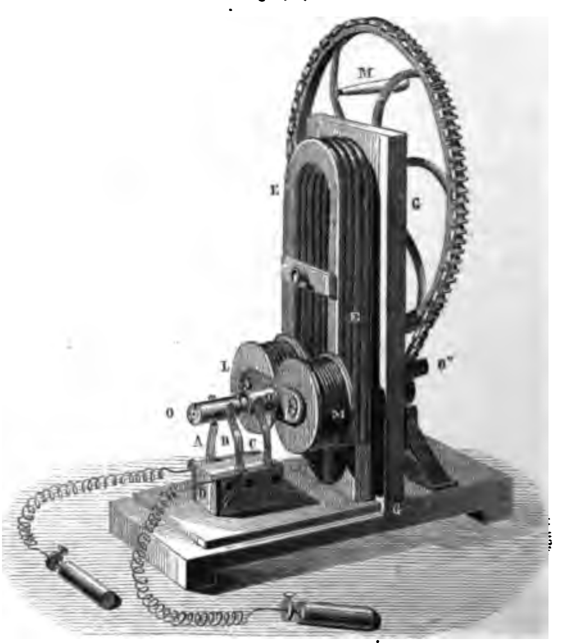


III. — MACHINES DYNAMO-MAGNÉTIQUES.

Machines de Clarke et de Page. — Outre la machine de Ruhmkorff, il y a des électromoteurs fondés sur les courants d'induction produits par le mouvement ; le premier fut construit par Pixii. Clarke l'a avantageusement remplacé par le suivant, qui repose sur le même principe. Un aimant EE (*fig.* 414) est fixé verticalement ; deux bobines L, M, enroulées sur deux noyaux de fer doux, tournent autour de l'axe OO' et viennent passer, à chaque demi-révolution, en face des pôles de l'aimant. Les deux bouts du fil enroulé se rendent aux extrémités de l'axe OO', et l'on recueille les courants à l'aide des languettes A, B, C. Chaque fois qu'une des bobines

se rapproche d'un pôle, elle est traversée par un courant déterminé, et lorsqu'elle s'éloigne, par un courant de sens contraire. A chaque demi-tour on recueille donc des courants de sens opposés.


Fig. 414.



Pour leur donner la même direction, on termine l'axe OO′ par un commutateur, représenté *fig.* 415. Les deux demi-anneaux *l*, *m*, qui communiquent respectivement avec les deux extrémités du fil des bobines M et N, sont séparés par de l'ivoire, et la rotation met l'un et l'autre alternativement en contact avec les languettes fixes A et B. Or les communications sont interverties au moment où les courants induits changent de sens dans L et M; par conséquent ces courants ont toujours la même direction dans le circuit extérieur qui réunit A et B.

On constate avec cette machine que les courants d'induction ont toutes les propriétés des courants ordinaires : ils produisent les mêmes effets chimiques, calorifiques et lumineux. Ils offrent ceci de remarquable qu'ils ont une grande tension et qu'ils donnent de violentes commotions. Pour augmenter encore leur action, on termine l'axe par un prolongement

représenté *fig.* 416; l'un des bouts du fil arrive sur un premier anneau *l*,

Fig. 415.

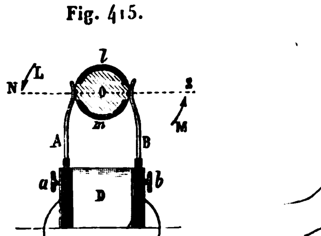
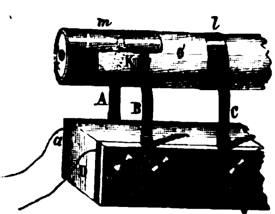


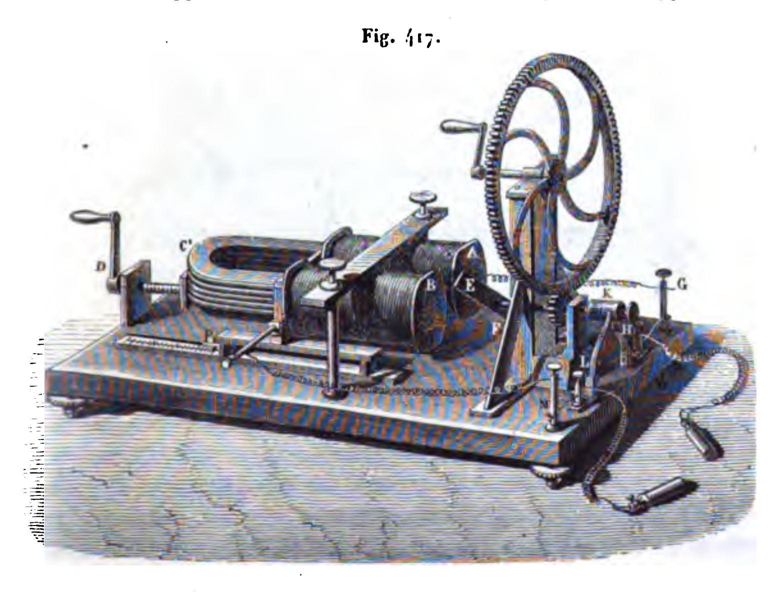
Fig. 416.



l'autre sur un deuxième *m*, interrompu en K. Les deux languettes B et C communiquent entre elles et transmettent le courant, excepté au moment où passe l'intervalle K; c'est celui où ils ont leur plus grande intensité. Alors il se forme un extra-courant qui passe de A à C par le fil *ab*; et, si l'on tient les extrémités de ce fil dans les deux mains, on éprouve une série de commotions violentes.

On a beaucoup varié la forme de cet appareil d'induction, surtout en vue de ses applications médicales. La *fig.* 417 représente l'appareil de

Fig. 417.



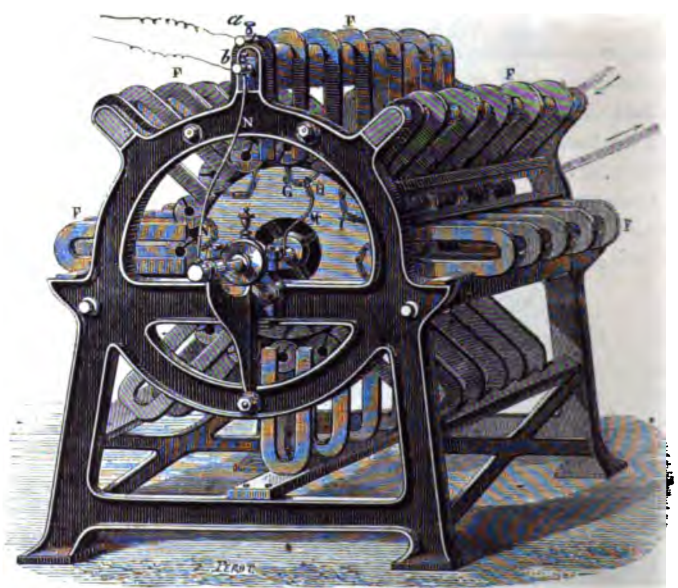
’age. Un morceau de fer doux EF tourne rapidement en face des pôles

de l'aimant ABC, dont on règle la position par la vis D. Pendant qu'il s'aimante à chaque demi-tour dans des sens alternativement contraires, il excite dans les bobines A, B des courants que l'on recueille à l'aide des languettes L, H, qui s'appuient en K et qui permettent aussi de recueillir un extra-courant.

Machine de Nollet. — Vers 1850, le principe de l'appareil de Clarke fut appliqué par Nollet à la construction d'une machine puissante, qui a été perfectionnée plus tard par J. van Malderen. Cette machine est représentée dans la *fig.* 418.

Fig. 418.

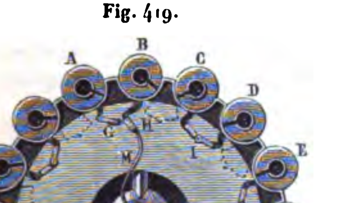


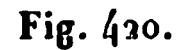


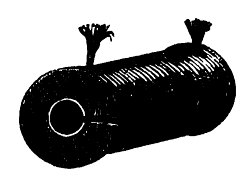
Sur un bâti en fonte, des traverses de bois maintiennent quarante faisceaux aimantés F, F,..., qui peuvent porter chacun près de 70 kilogrammes; ils sont disposés de manière à former cinq couronnes parallèles de huit aimants chacune, dont les seize pôles alternativement contraires sont rangés sur une circonférence. Cette partie de l'appareil est fixe, celle que nous allons décrire (*fig.* 419) tourne autour d'un arbre central. Elle se compose de quatre plateaux de bronze placés entre les couronnes d'aimants et portant chacun une ceinture de seize bobines A, B, C,... (*fig.* 420) enroulées dans le même sens, mais réunies par leurs extrémités contraires, de sorte

qu'un même courant les traverse en des directions opposées. Ces bobines passent successivement devant les seize pôles des ceintures d'aimants entre lesquelles elles se meuvent. Quand elles s'approchent, il y a seize courants d'induction invérse qui s'ajoutent; quand elles sont vis-à-vis, il ne se produit rien; quand elles s'éloignent, il se fait seize courants directs dans la somme des circuits dont les extrémités sont l'une en G, l'autre en H.

Fig. 419.




Fig. 420.



On peut grouper les quatre plateaux de deux manières : 1° faire communiquer entre eux toutes les extrémités, telles que H, et toutes les autres G; c'est comme si l'on réunissait quatre piles par leurs pôles de même nom; l'appareil est disposé en *quantité;* 2° faire communiquer les pôles contraires des plateaux successifs; ils sont alors agencés en *tension*. L'un des pôles H est ordinairement réuni à l'arbre central par un fil HM, l'autre G a un anneau qui l'enveloppe et qui tourne avec lui, mais qui en est séparé par une lame de caoutchouc durci.

Quel que soit le mode d'assemblage, on obtient par chaque tour trente-deux courants alternativement contraires. A l'origine, on avait cherché à les redresser par un commutateur; mais il est difficile d'y réussir. On y a renoncé parce que, malgré leurs inversions fréquentes, les courants peuvent néanmoins produire une lumière continue qui équivaut à 180 becs Carcel, quand la vitesse est de quatre tours par minute; et, dès lors, la machine a pu être appliquée avec succès à l'éclairage et aux phares. Elle est mise en mouvement par une machine à vapeur de quatre chevaux de force, et l'on peut dire que ces électromoteurs empruntent à la machine motrice, sous forme de travail mécanique, une quantité donnée de la chaleur, et qu'ils la régénèrent par l'intermédiaire d'un courant électrique dans les résistances intérieures et extérieures. Les expériences faites par MM. Jamin et Roger, au laboratoire de physique de la Sorbonne, avec une machine à six plateaux, ont montré que les bobines d'induction peuvent être assimilées à des éléments de pile. La chaleur régénérée dans une résis-

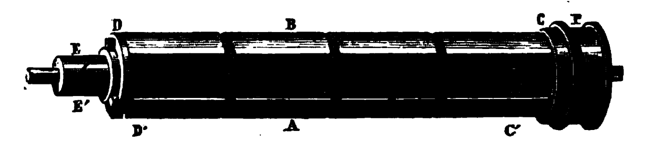
tance extérieure R est donnée par la formule $w = Ri^2$, que M. Joule a trouvée pour les piles, en posant $i = \frac{A}{R + r}$.

Les quantités A, r représentent ici la force électromotrice et la résistance intérieure de la machine; seulement r est une résistance fictive très-grande, beaucoup plus grande que celle que les bobines opposent au passage d'un courant continu.

Cette grande résistance que les plateaux opposent au passage des courants alternatifs caractérise l'induction; elle explique les effets de tension et la lumière que les machines magnéto-électriques permettent d'obtenir.

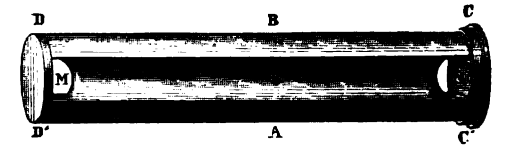
Bobine de Siemens. — Machine de Wilde. — M. Siemens a donné aux bobines des électromoteurs une forme nouvelle qui est représentée *fig.* 421. Elle se compose d'un cylindre de fer doux (*fig.* 422), qui a été

Fig. 421.



évidé et percé de deux trous M et N, de manière à ne laisser subsister que les parties extérieures DBC, D'AC', séparées par une gorge longitudinale et maintenues par un noyau MN. On dispose les fils sur ce noyau de M en N, et il est clair que, s'ils sont traversés par un courant, la bobine s'aimante et prend deux pôles longitudinaux : l'un DBC, l'autre D'AC

Fig. 422.



Réciproquement, si l'on aimante ou qu'on désaimante ces pôles, le fil sera traversé par des courants induits. La *fig.* 421 représente cette bobine achevée; elle est mobile autour de son axe; les deux extrémités du fil aboutissent à deux pièces E et E', séparées par une section oblique et qui forment commutateur; en P est une poulie à gorge, destinée à recevoir la courroie qui mettra l'appareil en mouvement.

Cette bobine est employée dans la machine de Wilde (*fig.* 423), qui se compose de deux étages semblables, mais de dimensions différentes. A est

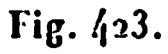
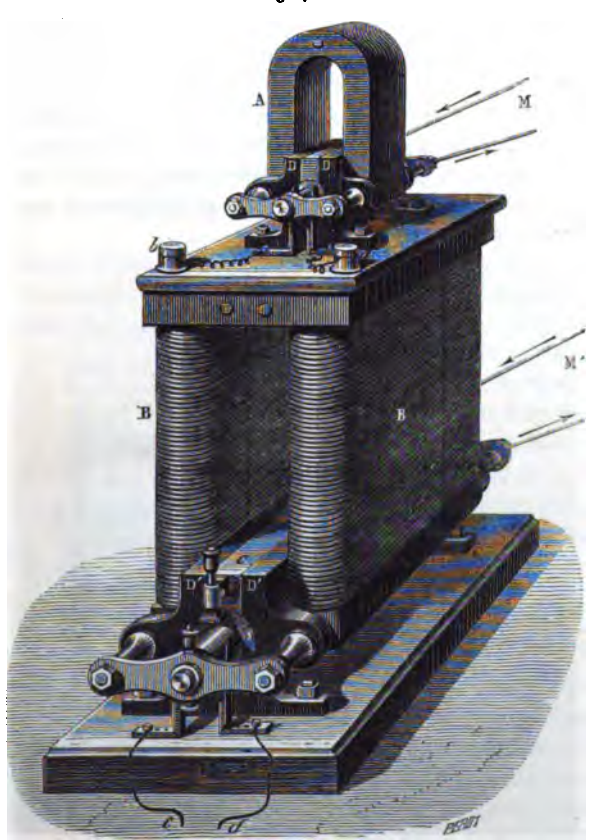


Fig. 423.



un faisceau aimanté. Une petite bobine de Siemens qui tourne dans le creux des armatures DD s'aimante dans des sens alternativement contraires, et produit des courants d'induction qui sont redressés par le commutateur et dirigés dans le fil BB d'un puissant électro-aimant BB, qui consiste en deux plaques de fer doux sur lesquelles s'enroulent 1000 mètres de fil de cuivre isolé, et dont les armatures D'D' très-allongées et évidées laissent entre elles une cavité cylindrique. Dans cette cavité tourne une

seconde bobine de Siemens, parallèle à la première, mais plus grande, et portant un fil plus long dans lequel se développent des courants alternatifs qu'on recueille en *c*, *d*. On peut encore augmenter la puissance de la machine en faisant passer le courant *cd* dans un second électro-aimant plus grand que le premier, entre les pôles duquel tourne une troisième bobine. Avec une machine à triple effet de cette construction, M. Wilde a pu faire fondre un fil de fer de 6 millimètres de diamètre sur une longueur de 37 centimètres, et le pouvoir éclairant de la lumière électrique fournie par cette machine n'était pas moins extraordinaire. Toutefois, elle a l'inconvénient d'exiger une vitesse de rotation très-grande, de 1500 à 2000 tours par minute; il en résulte que les armatures s'échauffent et que l'enveloppe des fils est souvent brulée.

CHAPITRE VI.

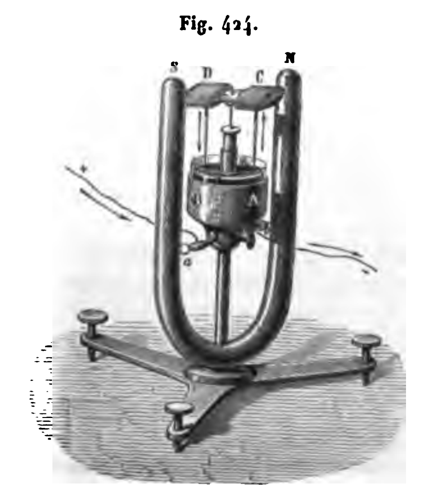
MOTEURS ÉLECTRIQUES ET TÉLÉGRAPHES.

I. — MOTEURS ÉLECTRIQUES.

La possibilité d'aimanter et de désaimanter rapidement le fer par l'action des courants a conduit à construire des moteurs électriques.

Concevons (*fig.* 424) un aimant NS en fer à cheval, et entre ses pôles un électro-aimant BC mobile autour d'un axe vertical. Un godet AB divisé en deux compartiments contient du mercure, qui s'élève au-dessus de la cloison. Les deux extrémités du fil de DC touchent ce mercure, mais non pas la cloison, et peuvent tourner autour de l'axe. Le courant de la pile arrive par *a* dans le compartiment A; il traverse CB, retourne en B, puis à la pile. Par l'effet de ce courant, C et D ont pris des pôles opposés à N et S; ils sont attirés et continuent leur route par la vitesse acquise. Au moment où ils passent vis-à-vis de N et de S, les extrémités du fil changent de compartiment, l'aimantation change de signe, les pôles sont repoussés, continuent leur route, et il en résulte une rotation très-rapide.

Fig. 424.

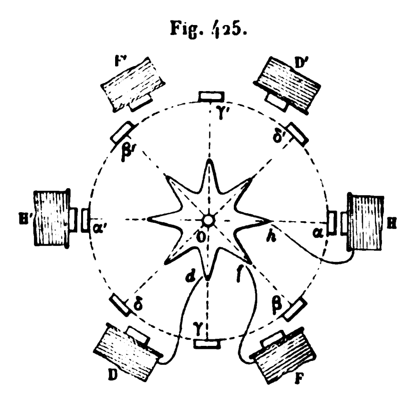


Par des constructions analogues, on a disposé de nombreux moteurs électriques. Nous donnerons ici le principe de l'un de ceux qui ont été imaginés par Froment.

Sur une roue circulaire mobile autour de O (*fig.* 425) est fixée une ceinture de huit fers doux équidistants, parallèles à l'axe, et dont les

extrémités se projettent en α, β, γ,...; chacun des angles αOβ, βOγ.... est égal à $\frac{1}{8}$ de circonférence. Tout autour et sur un support solide et fixe sont placés six électro-aimants en fer à cheval projetés en H, F, D,..., et chacun des angles HOF, FOD,... est égal à $\frac{1}{6}$ de circonférence. Par conséquent, lorsque deux électro-aimants H et H′ sont en face de deux fers doux α et α′, les suivants F et F′ sont en avance d'un angle égal à $\frac{1}{6} - \frac{1}{8} = \frac{1}{24}$ de circonférence sur les fers β et β′.

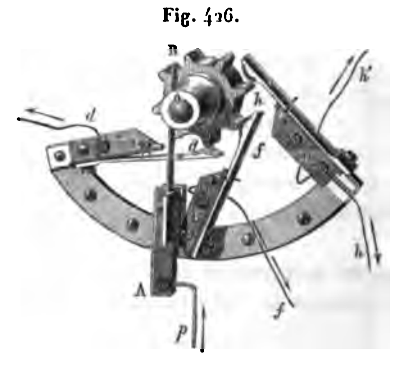
Fig. 425.



L'appareil est disposé de façon que, dans ce cas, le courant passe dans les électro-aimants F et F′; alors ils attirent β et β′, lesquels se mettent en mouvement et font marcher l'appareil de $\frac{1}{24}$ de tour, après quoi β et β′ sont en face de F et de F′. Aussitôt le courant cesse de passer dans F et F′; mais il est lancé dans D et D′, et ainsi de suite, de façon que pendant un tour la roue mobile est soumise à vingt-quatre actions attractives qui agissent dans le même sens, et seulement quand les fers sont très-près des électro-aimants.

Il nous reste à décrire le mécanisme qui produit cette distribution des courants. Il y a sur l'axe de la roue mobile une pièce portant huit dents qui correspondent aux fers doux α, β, γ, qui se meut avec eux, et qui est en communication permanente avec le pôle positif de la pile. Puis il y a trois ressorts h, f, d qui peuvent transmettre le courant respectivement à H et H′, F et F′, D et D′; ils sont immobiles, et leurs extrémités occupent, par rapport aux dents, les mêmes positions que H, F, D par rapport aux fers α, β, γ.

Fig. 426.

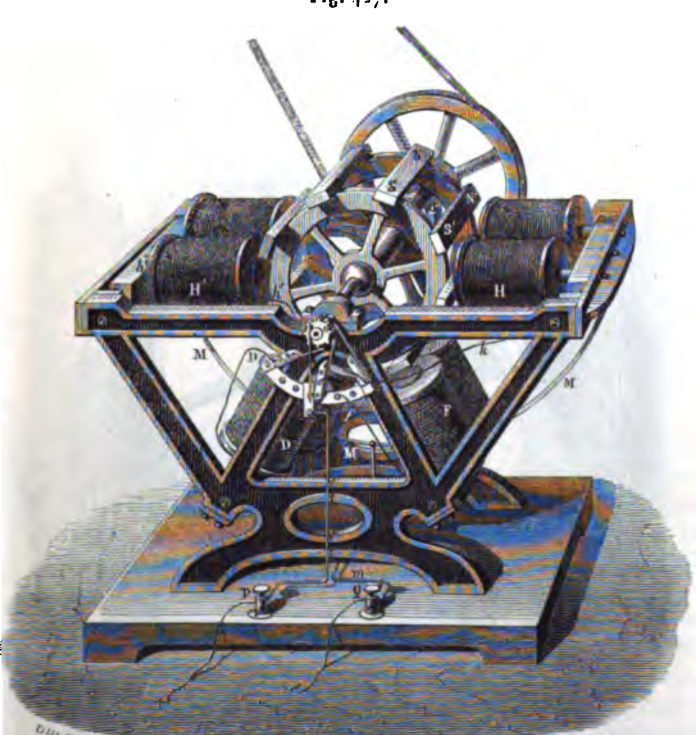


Quand α se place vis-à-vis H et dépasse cette position, une dent quitte le ressort h, mais la suivante touche f et lance le courant dans F et F′, jusqu'au moment où β

se met vis-à-vis F; alors une troisième dent rencontre *d* et envoie l'électricité dans D et D'.

La *fig.* 426 montre la disposition réelle des ressorts, et la *fig.* 427 l'ensemble d'une machine à laquelle manquent deux des électro-aimants qui

Fig. 427.



compléteraient la ceinture, ce sont ceux qui sont marqués F' et D' dans la *fig.* 425.

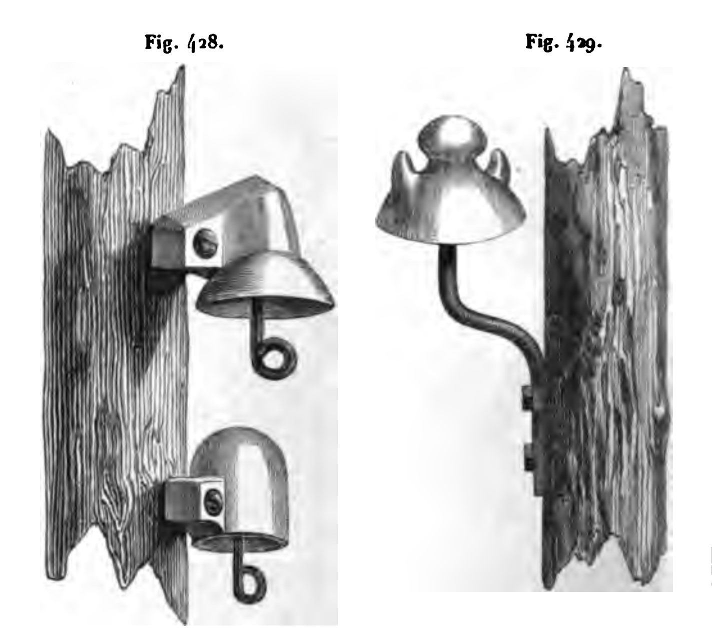
II. — TÉLÉGRAPHIE ÉLECTRIQUE.

La transmission télégraphique exige trois choses: 1° un fil conducteur qui relie les deux stations et que l'on nomme *fil de ligne* ou simplement *ligne;* 2° un instrument qui lance et interrompt l'électricité dans des

conditions déterminées : c'est le *manipulateur;* 3° un autre appareil, le *récepteur,* qui reçoit à la seconde station les signaux envoyés de la première.

Ligne. — Les lignes sont aériennes, souterraines ou sous-marines. Les premières sont constituées par des fils de fer galvanisés, supportés contre des poteaux. Pour qu'ils soient bien isolés, ils passent dans des crochets de fer sous des toits de porcelaine (*fig.* 428), ou glissent dans des anneaux

Fig. 428. Fig. 429.

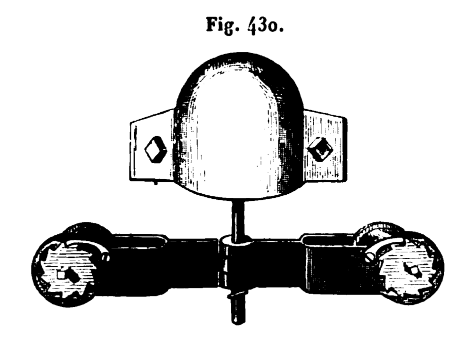


ouverts (*fig.* 429) formés par des mamelons saillants. De distance en distance ils sont enroulés sur des treuils (*fig.* 430), au moyen desquels on leur donne la tension convenable. Les lignes souterraines, employées pour le parcours des villes, sont isolées par une enveloppe de gutta-percha ou de bitume. Quant aux lignes sous-marines, elles sont généralement formées par des fils de cuivre entourés de gutta-percha, enveloppés de filin goudronné et revêtus d'un câble de fer qui leur donne toute la force nécessaire pour résister aux tractions et aux courants marins (*fig.* 431 et 432).

A la station de départ, le pôle négatif de la pile est plongé dans un puits profond contenant de l'eau, où son électricité se répand et se perd comme

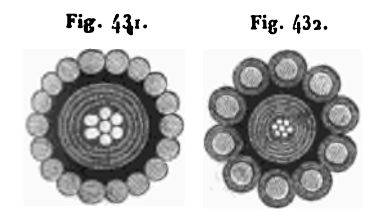
dans un réservoir de capacité infinie. L'électricité positive au contraire est dirigée dans la ligne qu'elle parcourt jusqu'à la station d'arrivée, où

Fig. 430.



elle est de même dirigée dans le sol. De cette façon, un seul fil est nécessaire, et sa résistance est la moitié de celle que le courant aurait à vaincre, s'il existait une ligne de retour. Cette simplification des lignes a été indiquée par M. Steinheil en 1837.

Fig. 431. Fig. 432.

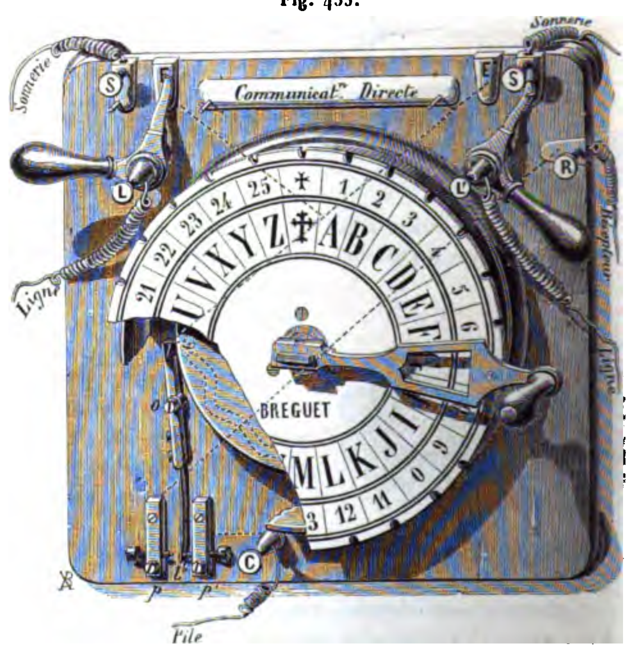


Les appareils qui servent à la transmission des dépêches (manipulateurs et récepteurs), sont très-variés. Nous nous contenterons de décrire les plus employés.

Télégraphe à cadran de Bréguet. — Le manipulateur (*fig.* 433) se compose d'une planche de bois sur laquelle est un cadran fixe qui porte deux circonférences concentriques, l'une intérieure, sur laquelle on voit d'abord une croix + et ensuite les vingt-cinq lettres de l'alphabet, l'autre extérieure, où sont écrits 0, 1, 2,..., 25; toutes deux sont divisées en vingt-six parties, auxquelles correspondent 26 encoches extérieures que l'on voit sur le bord du cadran. Une manivelle, mobile autour du centre et percée d'une fenêtre à travers laquelle on voit les lettres et les chiffres, peut être déplacée à la main; elle porte une goupille, fixée à sa face inférieure, qui s'applique et s'arrête dans les encoches suivant qu'on veut désigner les lettres A, B, C,..., ou les chiffres 0, 1, 2, 3,.... Cette manivelle est solidaire avec une plaque circulaire de cuivre qui tourne avec elle et dont on voit une partie au-dessous du cadran; elle est sillonnée d'une rainure sinueuse qui offre treize dépressions et treize dents obtuses, et qui est figurée par une ligne ponctuée. On voit enfin une tige lOl',

terminée en l' par un ressort flexible, mobile autour de O et portant en l une pointe engagée dans la rainure, dont elle est assujettie à suivre les sinuosités. De là il résulte qu'en faisant faire à la manivelle F un tour complet, on voit la pointe l s'éloigner treize fois du centre, s'en rapprocher treize fois et déterminer des oscillations pendant lesquelles le ressort l' s'appuie treize fois sur un butoir p et treize fois sur un autre p'.

Fig. 433.



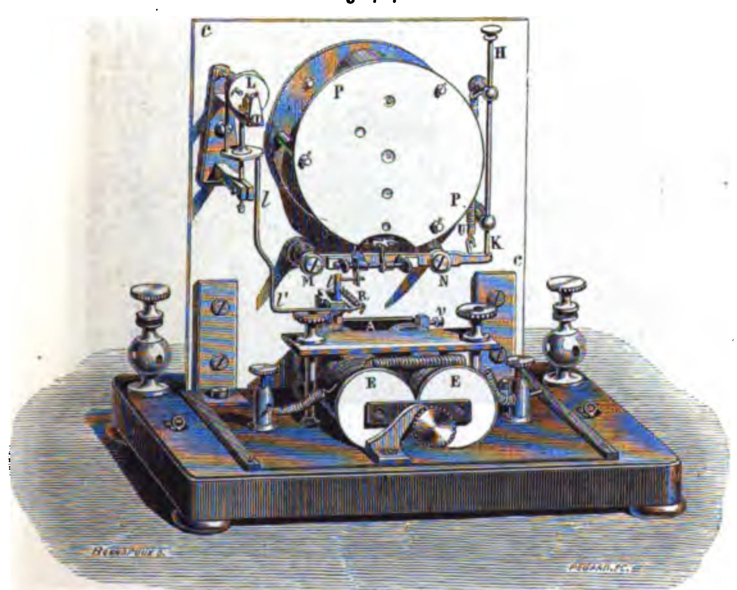
p est relié avec le récepteur R de la station, mais B est en communication avec C et le pôle positif de la pile.

Lorsque la manivelle est placée sur le signe +, il y a une interruption entre p' et l', et le circuit est ouvert; mais quand on transporte cette manivelle vis-à-vis de la lettre A, le point l' bute sur p' et le courant passe de l en E ou F, et de là dans la ligne L ou L'. Si l'on continue de faire mouvoir la manivelle, le courant passe quand elle est en regard des chiffres ou des lettres impairs; il est interrompu quand elle s'arrête vis-à-vis des chiffres ou des lettres pairs, et le nombre total des communications et des interruptions est égal au rang de la lettre. Quand on veut désigner

l'une d'elles, on transporte rapidement la manivelle de gauche à droite à partir de +, et on la laisse ensuite en repos pendant quelque temps vis-à-vis la lettre que l'on a atteinte, afin d'appeler l'attention sur elle.

Récepteur. — Les courants alternatifs envoyés par le manipulateur à la station d'arrivée passent dans le récepteur (*fig.* 434) à travers un élec-

Fig. 434.



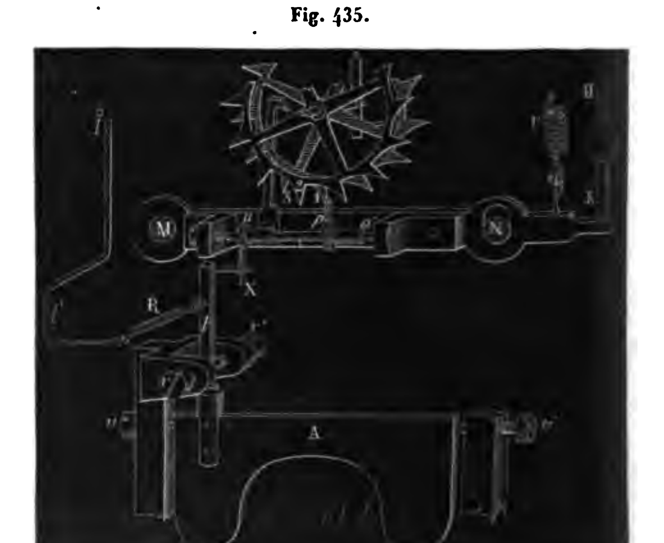
tro-aimant EE. A chaque passage, ils attirent un contact A ; à chaque interruption, un ressort antagoniste le ramène. Ainsi ce contact exécute un nombre d'oscillations égal au rang de la lettre que le manipulateur a indiquée.

La *fig.* 435 montre le contact en A ; il oscille autour de *vv'* et fait mouvoir un levier *tx* entre deux vis *r*, *r'* qui limitent sa course. La goupille X transmet les oscillations à un axe *aa'*, et celui-ci à une plaque verticale *p* qui vient s'interposer entre les dents de deux roues d'échappement qu'on voit au-dessus. Les dents de ces roues sont au nombre de 13 et elles sont croisées ; ainsi 1 et 3 appartiennent à la roue postérieure et 2 à la roue antérieure.

Dans la figure, la lame *p* est portée en arrière et arrête la dent 1, l'os-

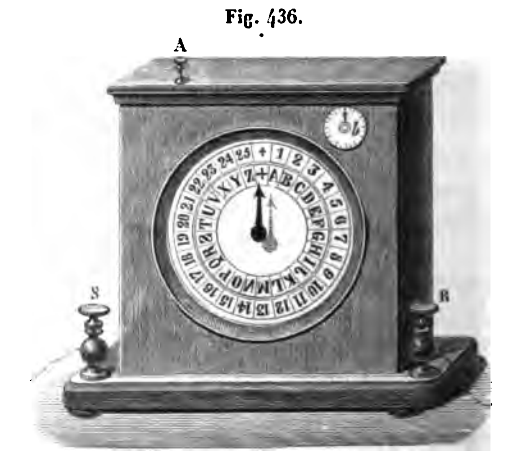
cillation la ramène en avant et elle bute contre 2, puis elle retourne en

Fig. 435.



arrière et arrête 3. D'où il suit qu'à chaque mouvement l'axe marche

Fig. 436.

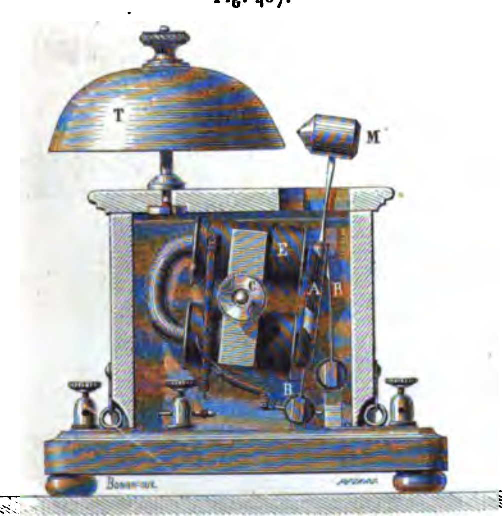


de $\frac{1}{26}$ de tour, comme la manivelle, et qu'il en reproduit les mouve-

ments. Or il commande une aiguille qui se meut sur un cadran identique à celui du manipulateur, et celle-ci s'arrête sur chacune des lettres que la manivelle désigne à l'autre station. La *fig.* 436 représente l'aspect extérieur du récepteur.

Sonneries. — Il est nécessaire que le surveillant d'un poste soit prévenu par un signal, quand on se dispose à lui envoyer une dépêche. On emploie, à cet effet, des sonneries. La suivante (*fig.* 437) est fondée sur

Fig. 437.



le même principe que la sirène électrique. Un électro-aimant E reçoit, par sa branche supérieure E, le courant qui revient ensuite par B dans le contact A et de là dans un ressort R, qui le ramène à la terre. Aussitôt qu'il passe, le contact est attiré et le marteau M, qui termine le levier, frappe sur le timbre T. Mais ce mouvement a séparé A de R et interrompu le courant; alors le contact se sépare de l'aimant et revient à sa position première, ce qui renouvelle les mêmes actions.

Composition d'un poste. — On voit par la *fig.* 438 que le manipulateur est interposé dans la ligne qu'il interrompt. Elle arrive en L et reprend en L'. Deux commutateurs à poignée L et L' peuvent la diriger en S et S' vers les sonneries. Dans cette situation, le poste est dans l'attente, et il est averti par l'une des sonneries qu'une dépêche lui arrive,

soit de L, soit de L'. Supposons qu'elle vienne de L : alors le surveillant dirige le commutateur sur F, ce qui, par une lame métallique qu'on a figurée par un trait ponctué, réunit F avec l, avec p, et de là, par pR, au récepteur. Si le correspondant veut que sa dépêche franchisse le poste

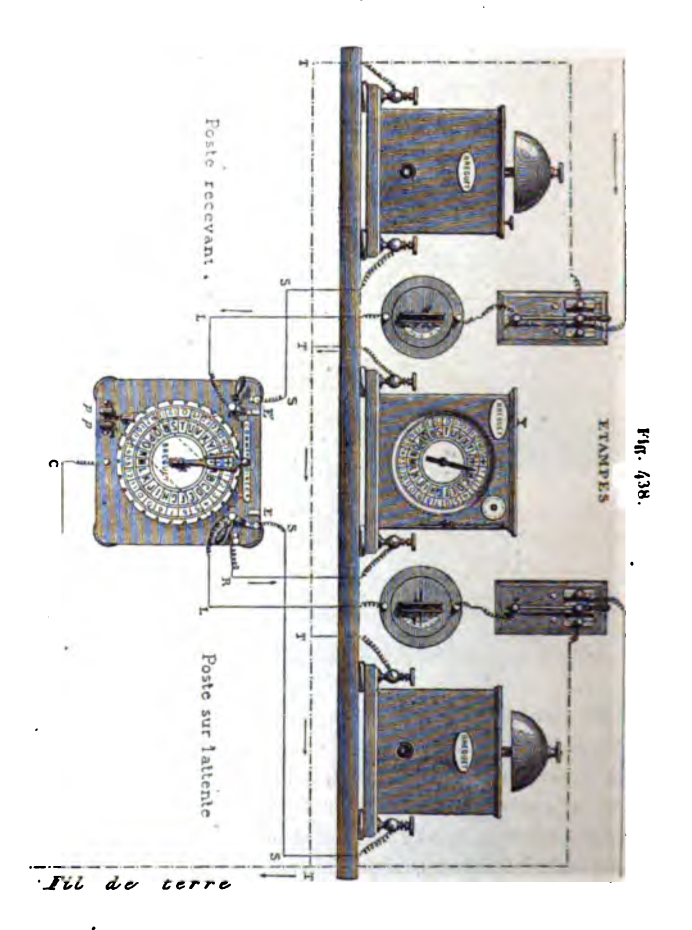


Fig. 438.

sans s'y arrêter, il le demande, et alors on réunit L avec F, L' avec E, ce qui établit la communication directe.

L'employé veut-il parler à l'un des deux postes qui précèdent ou qui suivent, il commence par se mettre en rapport avec la ligne correspondante, puis il fait un tour entier avec la manivelle, ce qui lance plusieurs

fois un courant dans la ligne et prévient le préposé de la station à laquelle il veut écrire; ensuite il attend, avec son récepteur ouvert, qu'on lui ait annoncé que sa dépêche sera reçue; enfin il fait fonctionner son manipulateur. La *fig.* 438 représente les dispositions générales d'un poste avec deux sonneries, deux boussoles, deux paratonnerres, un manipulateur et un récepteur.

Télégraphe Morse. — Le télégraphe à cadran employait l'alphabet ordinaire avec un mécanisme compliqué; la disposition suivante adopte des signes conventionnels avec des instruments plus simples. Le manipulateur (*fig.* 439) est un simple levier conducteur ADB mobile en D, toujours


Fig. 439.

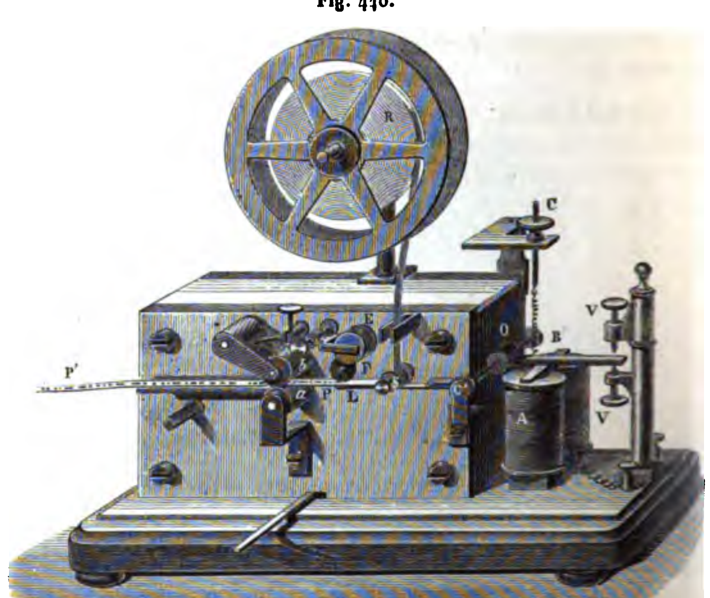


pressé par un ressort sur le bouton P', mais qu'on peut mettre en contact avec P en appuyant sur la poignée A. La ligne communique avec L, le récepteur avec R, et la pile du poste avec S. Il est évident que, pendant le repos de l'appareil, les courants qui arrivent en L sont transmis par P' au récepteur. Quand, au contraire, on veut envoyer des signaux dans la ligne, on abaisse le levier sur P, alors le courant de la pile part de S, entre dans cette ligne L et circule pendant tout le temps que le levier est abaissé. Il y a deux sortes de signaux, qu'on produit en pressant sur la poignée pendant un temps très-court ou plus long.

La pièce principale du récepteur (*fig.* 440) est un levier LC'OB, commandé par l'électro-aimant A; la branche OB est attirée quand le courant passe, et se relève par l'effet du ressort BC à chaque interruption; les butoirs V, V servent à limiter ses oscillations. Le courant de la ligne étant alternativement lancé et interrompu dans la bobine A, les deux bras OB et CL du levier reproduisent tous les mouvements du manipulateur. Au-dessus de l'extrémité L passe un ruban de papier RSPP', emmagasiné sur un rouleau R; il est entraîné d'un mouvement uniforme entre deux cylindres *a*, *b*, qui tournent autour de leurs axes par l'effet d'un rouage contenu dans la boîte de l'appareil. Quand le courant passe et que l'ex-

trémité B du levier s'abaisse, l'extrémité L se relève et pousse le ruban contre une molette F, qui est couverte d'encre grasse ; cette molette im-

Fig. 440.



prime alors sur le papier un trait court ou long, selon la durée du contact.

En combinant de diverses manières les traits longs et courts, on représente les lettres de l'alphabet, comme il suit :

·—	—···	—·—·	—··	·	··—·	—··	····	··	·———
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J

—·—	·—··	——	—·	———	·——·	——·—
K	L	M	N	O	P	Q

·—·	···	—	··—	···—	·——	—··—	—·——	——·
R	S	T	U	V	W	X	Y	Z

Les lettres successives d'un mot sont séparées par des intervalles blancs, les mots successifs d'une phrase par des intervalles un peu plus grands.

LIVRE VI.

DE L'ACOUSTIQUE.

CHAPITRE PREMIER.

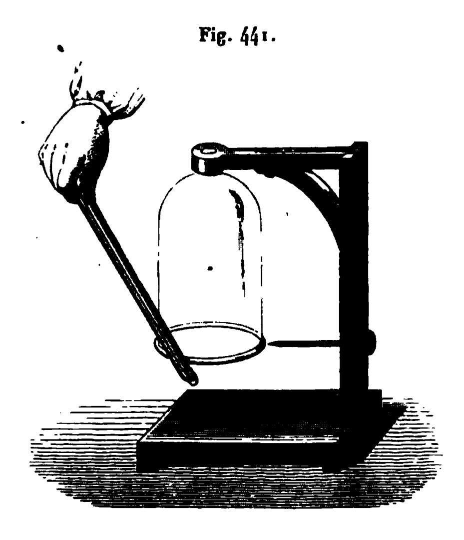
DE L'ÉVALUATION NUMÉRIQUE DES SONS.

I. — VIBRATIONS. — LEUR ORIGINE. — LEUR TRANSMISSION.

Le son est une impression que perçoit l'oreille. Il résulte de trois phénomènes consécutifs :

1° Il est déterminé par un mouvement vibratoire des corps solides, liquides ou gazeux. C'est ainsi qu'une corde tendue, une verge serrée dans

Fig. 441.



un étau, une cloche, un timbre produisent des sons, quand on les écarte

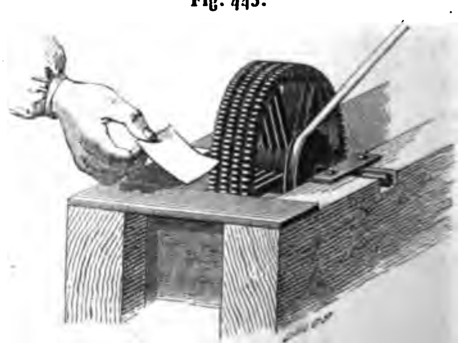
momentanément de leur position d'équilibre, en les frottant avec un archet ou autrement. On démontre l'état vibratoire de ces corps, en remarquant que les cordes font sauter des chevalets de papier, que les verges projettent le sable qu'on y sème, que la cloche (*fig.* 441) vient périodiquement frapper une pointe placée à une petite distance de sa surface extérieure, que le timbre (*fig.* 442) communique des soubresants très-vifs à une bille placée dans son intérieur.

Fig. 442.



On peut aussi produire des sons par des actions mécaniques répétées à de très-petits intervalles : par une carte flexible que l'on appuie sur le contour d'une roue dentée en mouvement et qui s'abaisse ou se relève quand une dent la rencontre ou la quitte (*fig* 443) ; par un courant de gaz ou de liquide dirigé normalement contre un disque tournant percé de trous et qui passe ou est intercepté alternativement (*fig.* 444)

Fig. 443.



par la rotation dans l'air d'un corps dissymétrique, etc. Quand un jet de gaz vient se briser contre le biseau d'un sifflet, il se partage en deux autres, l'un qui s'échappe dans l'atmosphère, l'autre qui pénètre dans le sifflet et

comprime la première tranche d'air intérieur. Cette tranche comprimée s'oppose à une nouvelle entrée de gaz, jusqu'à ce qu'elle ait transmis sa pression aux couches suivantes. Il y a donc encore ici des alternatives périodiques de compression et de dilatation.

Fig. 444.



2° Le son, étant produit par des vibrations, ne saurait se transmettre à l'oreille que par un intermédiaire élastique capable de communiquer le mouvement de proche en proche. Le plus souvent, cet intermédiaire est l'air. On le démontre en suspendant par un fil de soie ou de lin, dans un ballon vide (*fig.* 445), une petite clochette que l'on fait sonner en agitant l'appareil. Le son est intercepté tant que le ballon est vide, mais il est transmis, et l'oreille le perçoit, si l'on rétablit la continuité entre le corps sonore et cet organe, soit en laissant rentrer l'air, soit en remplissant le ballon avec un liquide, soit en soutenant la clochette par un fil élastique.

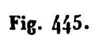


Fig. 445.



3° Le dernier phénomène consiste dans les impressions que perçoit l'oreille. Elles varient à l'infini. On les divise d'abord en deux classes : les premières brusques, pour ainsi dire instantanées, ce sont les *bruits;* les autres prolongées et mélodieuses, et que l'on nomme *sons musicaux*. Mais l'on peut toujours considérer les bruits soit comme des mélanges de notes discordantes, soit comme des notes musicales de très-courte durée. Ainsi, lorsqu'on fait tomber sur le plancher, l'une après l'autre, sept lames de bois dur dont les dimensions décroissent suivant une certaine loi déterminée, on entend les sept notes de la gamme, tandis que le bruit d'une lame isolée semble n'avoir aucun caractère musical.

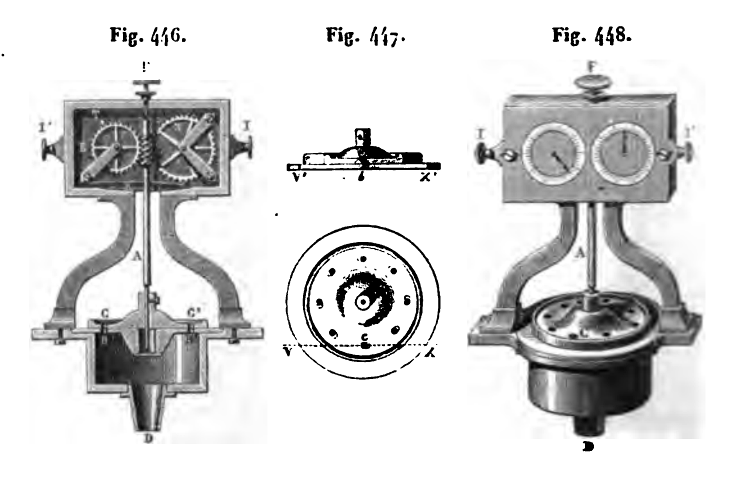
Laissant de côté les bruits sur lesquels on sait peu de chose, nous étudierons seulement les sons des divers instruments de musique. Ils se distinguent par trois qualités distinctes : 1° le *timbre*, qui dépend de l'instrument et dont nous indiquerons la cause; 2° la *force* ou l'*intensité;* 3° enfin la *hauteur*. C'est de cette qualité, qui est la plus importante, que nous allons d'abord nous occuper.

II. — MESURE DU NOMBRE DE VIBRATIONS.

Toutes les expériences ayant prouvé qu'une note est d'autant plus élevée qu'elle résulte de vibrations plus rapides, on a été conduit à comparer la hauteur d'un son avec le nombre de vibrations qui le produit. Pour mesurer ce nombre, on emploie divers procédés que nous allons décrire.

Sirène. — Cet instrument, imaginé par Cagniard-Latour, est représenté dans les *fig.* 446, 447 et 448. Un tambour cylindrique DBB' dans lequel

Fig. 446. Fig. 447. Fig. 448.



on insuffle de l'air par un tuyau D, est terminé par un disque supérieur BB', percé sur sa circonférence d'un certain nombre de trous équidistants. Supposons qu'il y en ait 8. Un deuxième disque métallique CC', placé au-dessus et très-près du premier, tourne autour d'un axe vertical AF; il est lui-même percé de 8 trous, qui peuvent se placer en coïncidence ou en opposition avec ceux du disque fixe, et par conséquent laisser passer ou arrêter le courant d'air.

Si le plateau supérieur tourne rapidement, il ouvre et ferme alternativement 8 fois les conduits pendant un tour, et il y a 8 impulsions imprimées à l'air extérieur, séparées par 8 intervalles de repos. Par conséquent, il y a 8 vibrations doubles ou 16 vibrations simples par tour.

Afin de pouvoir faire tourner le plateau mobile par les impulsions du courant d'air lui-même, les orifices fixes et mobiles sont percés obliquement (*fig.* 447), les premiers *b* de la gauche vers la droite, les seconds *c* de la droite vers la gauche. De cette façon, le courant, obligé de changer

sa direction brusquement, imprime de V′ à X′ une impulsion tangentielle au plateau supérieur, qui prend une vitesse d'autant plus grande que la pression de l'air est plus forte dans le tambour.

Si l'on fait communiquer le tube D avec une soufflerie par l'intermédiaire d'un robinet, l'appareil se met à tourner avec une vitesse croissante et produit un son qui, d'abord très-grave, s'élève peu à peu jusqu'à cesser d'être perceptible quand les vibrations deviennent trop rapides. En réglant le robinet, on peut maintenir ce son à une hauteur constante, et comme il y a 8 vibrations par tour, il suffit de mesurer le nombre de tours effectués pendant une seconde pour pouvoir calculer le nombre de vibrations exécutées pendant ce temps.

A cet effet, l'axe AF porte à sa partie supérieure une vis sans fin; elle engrène avec une roue dentée E, qu'elle fait marcher d'une dent par tour, et dont les mouvements sont accusés par une aiguille mobile sur un cadran extérieur (*fig.* 446 et 448). Soit 100 le nombre total des dents de la roue et des divisions du cadran; chaque division correspond à 8, et chaque tour à 100×8 vibrations. Après que la roue E a fait un tour complet, un bras T vient rencontrer une deuxième roue dentée H et faire marcher d'une division l'aiguille qui correspond à cette roue. Par conséquent, si pendant un temps T, la deuxième aiguille a marché de n et la première de n' divisions, le nombre des vibrations est égal à $n \times 100 \times 8 + n' \times 8$.

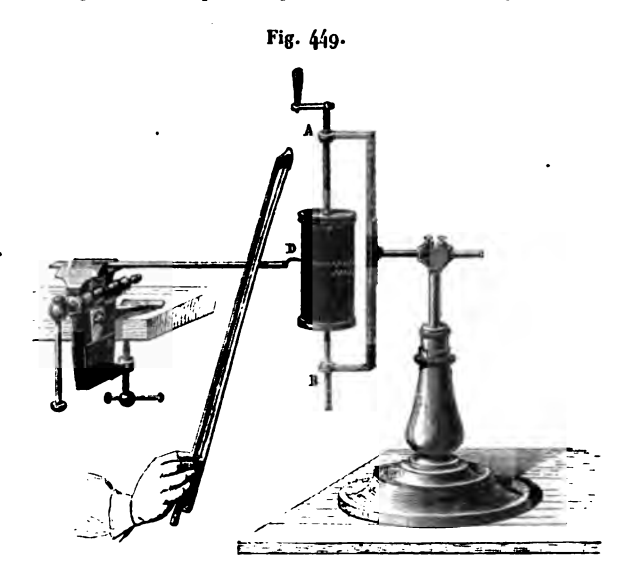
Enfin tout le système du compteur est porté sur une plaque qu'on peut déplacer d'une petite quantité soit de I′ vers I, ce qui fait engrener la roue E avec l'axe, soit de I vers I′, ce qui la rend indépendante de la vis sans fin. Dès lors, pour faire une mesure, on commence par élever le son jusqu'à la hauteur voulue en réglant le robinet; aussitôt qu'on y est parvenu, on engrène la sirène et l'on met en marche les aiguilles d'un compteur à secondes; puis, après un temps suffisamment long, on désengrène et l'on arrête le compteur. Cela donne à la fois le nombre des vibrations et le temps.

Roue dentée. — Savart a employé un autre appareil, qui offre moins d'avantages que la sirène : c'est une roue dentée (*fig.* 443) que l'on mettait en mouvement par une courroie enroulée sur un grand volant à manivelle. Une carte appuyée sur le contour de la roue produisait autant de vibrations doubles par tour qu'il y avait de dents, et le nombre des tours était mesuré par un compteur identique à celui de la sirène.

Procédé graphique. — On doit enfin à M. Duhamel une méthode qui consiste à faire tracer par le corps sonore lui-même les vibrations qu'il exécute (*fig.* 449). A cet effet, il est muni d'une pointe D, qui appuie sur

un cylindre couvert de noir de fumée et porté sur une vis sans fin AB. Quand le corps ne vibre pas et qu'on fait tourner le cylindre, la pointe

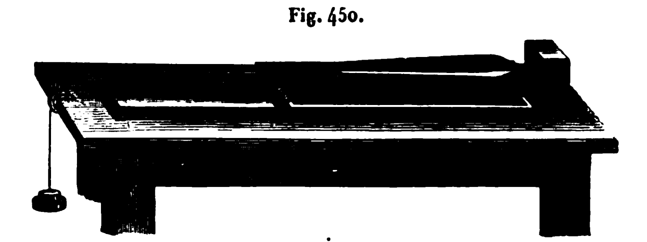
Fig. 449.



enlève le noir et décrit une hélice unie, mais quand il vibre, cette hélice est tremblée, et chaque sinuosité correspondant à une oscillation, leur nombre mesure celui des vibrations qui ont été produites pendant le temps de l'expérience, temps qui est compté par un chronomètre.

Cette méthode sert principalement à comparer les nombres de vibrations que donnent un corps sonore et un diapason fixe (*fig.* 450).

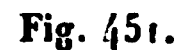
Fig. 450.

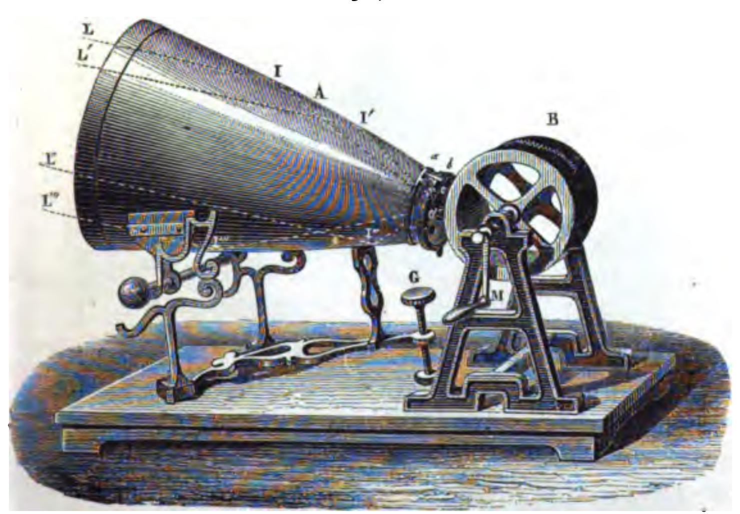


L'appareil est composé d'une planche, qu'on peut faire glisser le long d'une coulisse au moyen d'un poids, et sur laquelle est collé un verre noirci. Au-dessus, on a fixé un diapason; et, tout à côté du diapason, on

dispose le corps sonore qu'on veut étudier. Les deux corps vibrants portent un style appuyé sur le verre et qui trace les vibrations de l'un et de l'autre quand on fait glisser la planche.

Phonautographe. — Enfin M. Scott est parvenu à dessiner le tracé graphique d'un son quelconque au moyen de l'appareil suivant, que construit M. Kœnig (*fig.* 451). Il se compose d'un paraboloïde terminé par une


Fig. 451.



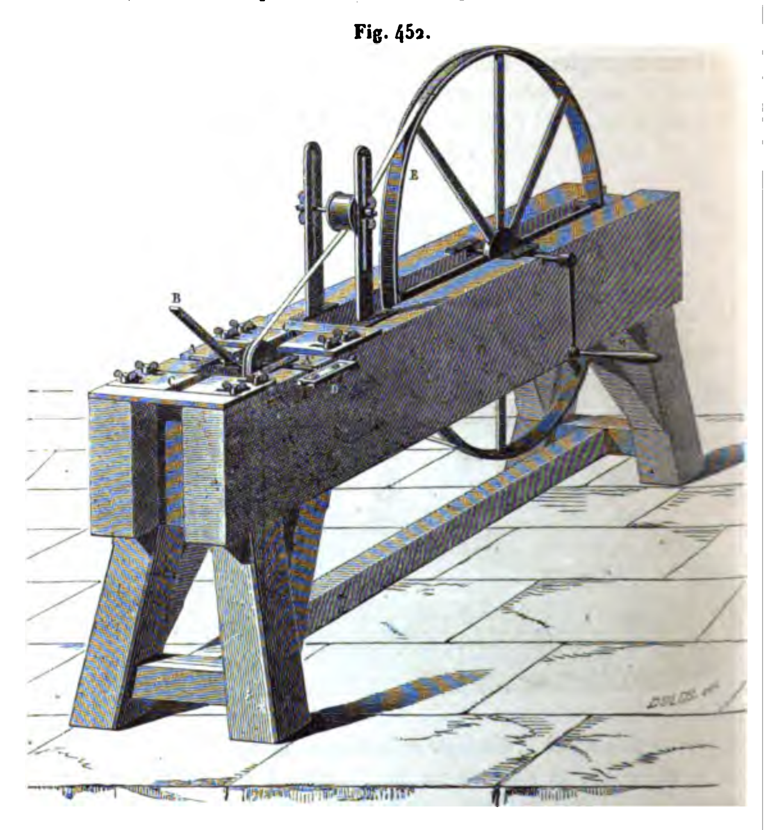
membrane très-mince *b*. Un style *b* formé par une soie de sanglier est fixé sur la membrane et s'appuie sur un cylindre B recouvert d'un papier noirci. Aussitôt que l'on émet un son dans le voisinage, il est concentré au foyer du paraboloïde, sur la membrane; le style entre en vibration et trace la courbe sur le cylindre.

Limite des sons perceptibles. — Grâce à ces divers procédés, on peut mesurer les nombres des vibrations de toutes les notes. On reconnaît d'abord que ces nombres augmentent ou diminuent avec la hauteur ou la gravité du son. On reconnaît, en outre, qu'il y a deux limites où les sons très-graves ou très-aigus cessent d'être entendus. Ces limites sont variables avec les diverses personnes : elles reculent d'autant plus que les intensités sont plus grandes.

Savart annonça que l'on peut percevoir un son correspondant à 8 vi-

brations. Il faisait tourner une barre de fer B (*fig.* 452) autour d'un axe horizontal, de manière qu'elle entrait, à chaque demi-révolution, dans une

Fig. 452.



fente CC' où elle produisait une sorte d'explosion. Quand elle faisait huit tours par seconde, on entendait, outre ces explosions, un son continu d'une gravité extrême.

D'autre part, les tuyaux d'orgues les plus longs ne peuvent donner un son plus grave que 16 vibrations. M. Helmholtz prétend même que les notes ne commencent à être perçues que vers 30 vibrations.

D'autre part, il a été démontré, avec des roues dentées d'un grand diamètre, que les sons aigus ne disparaissent qu'à 30000 vibrations. Despretz a encore reculé cette limite, en employant des diapasons qui se succédaient par octaves et qu'on entendait jusqu'à 36000 vibrations.

III. — LOIS NUMÉRIQUES DES ACCORDS MUSICAUX.

Unisson. — L'oreille nous apprend tout d'abord que des sons donnés par des instruments différents peuvent avoir une hauteur égale, quel que soit leur timbre : on dit qu'ils sont à l'*unisson*. Or, en mesurant, par les procédés qu'on vient de décrire, les nombres de vibrations de chacun d'eux, on les trouve identiques.

Réciproquement, tous les instruments qui produisent ces nombres de vibrations donnent la même note. On est ainsi conduit à cette loi fondamentale :

I. *Tous les sons de même hauteur sont définis et peuvent être exprimés par le nombre n de leurs vibrations.*

Intervalle musical. — Deux notes rendues par un instrument ont entre elles une certaine relation de hauteur que l'oreille perçoit et retient et qu'on nomme *intervalle*. L'expérience prouve que l'intervalle reste le même quand le rapport $\frac{n}{n'}$ des nombres de vibrations des deux notes demeure constant, et réciproquement ; on en conclut cette règle :

II. *L'intervalle musical entre deux notes est défini et peut être exprimé par le rapport $\frac{n}{n'}$ de leurs nombres de vibrations.*

Accords et dissonances. — L'expérience prouve que la superposition de deux notes nous impressionne agréablement ou péniblement ; qu'il y a des intervalles *consonnants* ou *dissonants*, des *accords* ou des *dissonances*, et qu'ils sont les mêmes pour tous les individus. Les intervalles consonnants sont peu nombreux ; l'expérience des siècles les a consacrés ; voici leurs noms et en même temps leur valeur $\frac{n}{n'}$.

Octave.	Quinte.	Quarte.	Tierce majeure.	Tierce mineure.
$\frac{2}{1}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{6}{5}$

Il faut encore ajouter la sixte majeure $\frac{5}{3}$, la sixte mineure $\frac{8}{5}$, la septième $\frac{15}{8}$, ... On remarquera que :

III. *Les intervalles consonnants sont représentés par des rapports simples.*

En général, on peut dire que *si l'on superpose deux notes exprimées par deux nombres de la série naturelle* 1, 2, 3, 4, 5, 6,..., *on formera un accord d'autant plus consonnant que le rapport sera plus simple, et qui deviendra d'autant plus dissonant que ce rapport sera plus complexe.* Les notes dont la hauteur relative est 1, 2, 3, 4,..., se nomment, en musique, la *série des notes harmoniques*.

Accords multiples. — Quand on superpose plus de deux notes dont les nombres des vibrations sont en rapports simples, elles donnent des *accords multiples*. Les deux plus remarquables sont formés par les sons 4, 5, 6, 8 et par 10, 12, 15, 20; ils se décomposent, le premier, dans les accords simples $\frac{5}{4}, \frac{6}{5}, \frac{3}{2}, 2, \frac{8}{5}, \frac{4}{3}$, c'est l'*accord parfait majeur;* le second en $\frac{6}{5}, \frac{5}{4}, \frac{3}{2}, 2, \frac{5}{3}, \frac{4}{3}$, c'est l'*accord parfait mineur*. L'un et l'autre se résolvent en intervalles consonnants.

Gamme. — Pour reproduire les intervalles consonnants, les seuls qui nous intéressent, la musique a admis une échelle de sept notes, appelée *gamme*.

Voici les noms de ces notes et les rapports de leurs nombres de vibrations à celui de la première :

Ut.	*Ré.*	*Mi.*	*Fa.*	*Sol.*	*La.*	*Si.*	*Ut₂.*
1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2

ou en réduisant au même dénominateur :

24	27	30	32	36	40	45	48

Cette gamme se continue par une seconde, une troisième, etc., commençant toutes par l'*ut* qui finit la précédente. Chacune se compose des mêmes séries de notes échelonnées dans le même rapport, et que l'on distingue par un indice qui marque le rang de la gamme. Ainsi l'on écrit ut_2, $ré_2$,..., pour la seconde; ut_3, $ré_3$..., pour la troisième, etc. De même on prolonge la série des notes en sens inverse par d'autres gammes descendantes affectées d'indices négatifs qui expriment leur rang de précession.

On a inscrit dans le tableau suivant les rapports de deux notes quelconques de la gamme; ce sont les intervalles musicaux nommés *secondes*, *tierces*, *quartes*, *quintes*, *sixtes*, *septièmes*, suivant que l'on compare les notes de deux en deux, de trois en trois, etc.

Valeurs des intervalles musicaux.

SECONDES.	TIERCES.	QUARTES.	QUINTES.	SIXTES.	SEPTIÈMES.
$\frac{ré}{ut}$ $\frac{9}{8}$	$\frac{mi}{ut}$ $\frac{5}{4}$	$\frac{fa}{ut}$ $\frac{4}{3}$	$\frac{sol}{ut}$ $\frac{3}{2}$	$\frac{la}{ut}$ $\frac{5}{3}$	$\frac{si}{ut}$ $\frac{15}{8}$
$\frac{mi}{ré}$ $\frac{10}{9}$	$\frac{fa}{ré}$ $\frac{6}{5}$ $\frac{80}{81}$	$\frac{sol}{ré}$ $\frac{4}{3}$	$\frac{la}{ré}$ $\frac{3}{2}$ $\frac{80}{81}$	$\frac{si}{ré}$ $\frac{5}{3}$	$\frac{ut_2}{ré}$ $\frac{9}{5}$ $\frac{80}{81}$
$\frac{fa}{mi}$ $\frac{16}{15}$	$\frac{sol}{mi}$ $\frac{6}{5}$	$\frac{la}{mi}$ $\frac{4}{3}$	$\frac{si}{mi}$ $\frac{3}{2}$	$\frac{ut_2}{mi}$ $\frac{8}{5}$	$\frac{ré_2}{mi}$ $\frac{9}{5}$
$\frac{sol}{fa}$ $\frac{9}{8}$	$\frac{la}{fa}$ $\frac{5}{4}$	$\frac{si}{fa}$ $\frac{4}{3}$ $\frac{25}{24}$ $\frac{81}{80}$	$\frac{ut_2}{fa}$ $\frac{3}{2}$	$\frac{ré_2}{fa}$ $\frac{5}{3}$	$\frac{mi_2}{fa}$ $\frac{15}{8}$
$\frac{la}{sol}$ $\frac{10}{9}$	$\frac{si}{sol}$ $\frac{5}{4}$	$\frac{ut_2}{sol}$ $\frac{4}{3}$	$\frac{ré_2}{sol}$ $\frac{3}{2}$	$\frac{mi_2}{sol}$ $\frac{5}{3}$	$\frac{fa_2}{sol}$ $\frac{9}{5}$ $\frac{80}{81}$
$\frac{si}{la}$ $\frac{9}{8}$	$\frac{ut_2}{la}$ $\frac{6}{5}$	$\frac{ré_2}{la}$ $\frac{4}{3}$ $\frac{81}{80}$	$\frac{mi_2}{la}$ $\frac{3}{2}$	$\frac{fa_2}{la}$ $\frac{8}{5}$	$\frac{sol_2}{la}$ $\frac{9}{5}$
$\frac{ut_2}{si}$ $\frac{16}{15}$	$\frac{ré_2}{si}$ $\frac{6}{5}$	$\frac{mi_2}{si}$ $\frac{4}{3}$	$\frac{fa_2}{si}$ $\frac{3}{2}$	$\frac{sol_2}{si}$ $\frac{8}{5}$	$\frac{la_2}{si}$ $\frac{9}{5}$ $\frac{80}{81}$
$\frac{10}{9}=\frac{9}{8}\frac{80}{81}$	$\frac{6}{5}=\frac{5}{4}\frac{24}{25}$	$\frac{16}{15}=\frac{10}{9}\frac{24}{25}$		$\frac{8}{5}=\frac{5}{3}\frac{24}{25}$	$\frac{9}{5}=\frac{15}{8}\frac{24}{25}$

I. Les intervalles de *seconde* ont trois valeurs différentes.

La première $\frac{9}{8}$ se nomme *ton majeur*.

La deuxième $\frac{10}{9}=\frac{9}{8}\frac{80}{81}$ est le *ton mineur;* il ne diffère du ton majeur que de l'intervalle $\frac{80}{81}$ appelé *comma*, qui est trop petit pour être apprécié par l'oreille.

La troisième $\frac{16}{15}=\frac{10}{9}\frac{24}{25}$ est ce qu'on nomme le *demi-ton majeur*.

L'intervalle $\frac{10}{9}$ est égal à $\frac{16}{15}\times\frac{25}{24}$, cela veut dire qu'un ton $\frac{10}{9}$ peut se partager en deux intervalles, l'un $\frac{16}{15}$, qui est le demi-ton majeur, l'autre $\frac{25}{24}$, qui est un peu plus petit et qu'on nomme le *demi-ton mineur*.

En résumé, la première colonne du tableau montre que la gamme est la succession de deux tons, d'un demi-ton, de trois tons et d'un demi-ton.

II. Les tierces sont de deux sortes, à un comma près : les unes $\frac{5}{4}$ sont majeures, les autres $\frac{6}{5} = \frac{5}{4} \cdot \frac{24}{25}$ sont mineures ; elles diffèrent des premières d'un demi-ton mineur.

III. Toutes les quartes sont égales à $\frac{4}{3}$, excepté *si* : *fa*, qui diffère d'un comma et d'un demi-ton mineur.

IV. A une seule près, qui est altérée d'un comma, toutes les quintes sont égales à $\frac{3}{2}$.

V. Les sixtes sont majeures et égales à $\frac{5}{3}$, ou mineures et égales à $\frac{8}{5}$.

VI. Deux septièmes sont mineures et égales à $\frac{15}{8}$, les autres majeures ou $\frac{9}{5}$.

VII. Les octaves sont invariablement égales à 2.

On voit, en résumé, que, prises convenablement deux à deux, les notes de la gamme reproduisent tous les intervalles consonnants.

Diéser ou *bémoliser* une note, c'est l'élever ou l'abaisser dans le rapport de 25 à 24, c'est-à-dire d'un demi-ton mineur. Ainsi *ut*♯ est égal à *ut* $\frac{25}{24}$, et *si*♭ est égal à *si* $\frac{24}{25}$. Si l'on dièse la plus grave de deux notes ou qu'on bémolise la plus aiguë, leur intervalle est diminué d'un demi-ton $\frac{25}{24}$; s'il était primitivement un ton $\frac{10}{9}$, il devient un demi-ton $\frac{16}{15}$. Quand, au contraire, on bémolise la note grave ou qu'on dièse la note aiguë, on élève l'intervalle d'un demi-ton $\frac{25}{24}$; s'il était primitivement un demi-ton $\frac{16}{15}$, il devient un ton $\frac{10}{9}$.

On peut commencer une gamme naturelle par une note quelconque et altérer les suivantes de façon à reproduire la succession des intervalles de la gamme d'*ut*. C'est par ce procédé que l'on *transpose* les morceaux de musique.

Diapason. — Pour accorder entre eux les instruments de musique, on a besoin de fixer la hauteur des notes, ou simplement de l'une d'elles. C'est dans ce but qu'on a imaginé le diapason ; c'est une fourchette d'acier qui rend toujours le même son, lorsqu'on la frappe avec un marteau de bois ou qu'on la fait vibrer au moyen d'un archet appliqué sur une des deux branches. Le *diapason normal* donne le la_3 de 435 vibrations doubles par seconde. C'est le son de la troisième corde du violon ; il appartient à la troisième octave de l'échelle musicale, qui commence à l'*ut* du violoncelle ou ut_1, auquel correspondent 65,25 vibrations doubles.

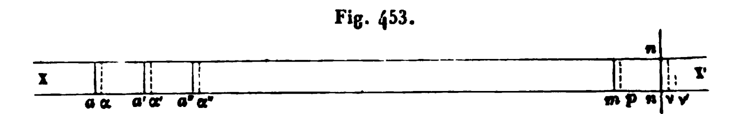
CHAPITRE II.

COMMENT SE PROPAGENT LES VIBRATIONS.

I. — DANS UN CYLINDRE INDÉFINI.

Vibrations longitudinales. — Supposons un cylindre indéfini XX' (*fig.* 453), formé par une substance élastique, solide, liquide ou gazeuse, que nous décomposons en tranches élémentaires aa', $a'a''$, $a''a'''$,.... Lorsque la section antérieure a aura reçu un déplacement $a\alpha$, elle comprimera la première tranche; celle-ci réagira par son élasticité et fera

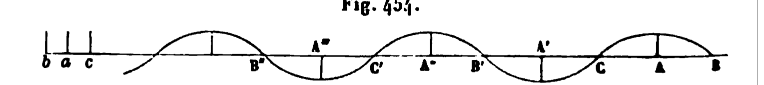
Fig. 453.



reculer la section a' d'une quantité $a'\alpha'$ égale à $a\alpha$. La deuxième tranche agira de même, et ainsi de suite; tout se passera comme dans une série de billes élastiques. La transmission se ferait de la même manière, si la section a, au lieu d'être chassée en avant, était tirée en arrière; seulement, les compressions seraient remplacées par des dilatations. Dans les deux cas, le mouvement se propage avec une vitesse a, qui est la *vitesse du son*.

Supposons maintenant que la tranche initiale exécute des vibrations régulières dont la durée est T. Elle part de b (*fig.* 454) avec une vi-

Fig. 454.



tesse de vibration nulle, qui augmente jusqu'en a, puis décroît et s'annule en c; ensuite, elle revient de c en b, et ainsi de suite. Toutes ces vitesses de vibration successives de la tranche initiale se transmettent à la suite l'une de l'autre avec la vitesse de propagation a, et, à un moment donné, elles sont arrivées en B, A, C, A', B', A'', C', A''', B'',.... Si on les représente par des ordonnées positives ou négatives, suivant que le mou-

vement se fait dans le sens de la propagation ou dans un sens contraire, elles figurent une courbe continue.

Si le temps croît, cette courbe se transporte parallèlement à elle-même avec une vitesse a, d'où il suit qu'un point tel que B prend successivement toutes les vitesses représentées de B en B''. Après un temps égal à celui d'une vibration double ou à T, le point B' s'est transporté en B. L'intervalle BB' est donc l'espace que le son a parcouru pendant le temps T d'une vibration double : c'est la *longueur d'onde*, que nous désignons par λ. Nous aurons

$$\lambda = a\mathrm{T}.$$

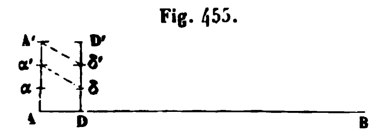
Si N est le nombre de vibrations exécutées en une seconde,

$$\mathrm{T} = \frac{1}{\mathrm{N}}, \quad \lambda = \frac{a}{\mathrm{N}}, \quad a = \lambda \mathrm{N}.$$

On remarquera que le mouvement qui, à un moment donné, anime la tranche $a\alpha$ (*fig.* 453) se transmet progressivement à des couches qui ont toujours la même masse. Par conséquent, il ne s'affaiblit pas avec la distance, et le son conserve la même intensité d'un bout à l'autre du cylindre. Cette remarque a conduit aux *tubes acoustiques,* constitués par des tuyaux flexibles qui traversent les édifices, et qui transmettent la parole à travers les cloisons et les distances, sans qu'elle soit affaiblie ni perçue par les personnes placées en des points intermédiaires.

Vibrations transversales. — Nous avons supposé, dans ce qui précède, que les vibrations se font dans le sens même de la propagation : ce sont les vibrations *longitudinales,* les seules que l'air ou les liquides transmettent. Les solides peuvent être ébranlés autrement. Imaginons une corde tendue AB, et supposons que l'on soulève le point A en α, α',..., A' (*fig.* 455). A cause de la solidarité qui existe entre A et D, le point D s'élèvera lui-même en δ, δ',..., D', et il en sera de même des points suivants. Mais toute transmission de mouvement exigeant un temps appréciable, la molécule D sera en δ quand A sera en α', en δ' quand A sera en A', et en D' quand A sera déjà redescendu de A' en α'. En un mot, la *vibration transversale* de A se transmet suivant AB, avec une vitesse de propagation a', qui n'est pas la même que celle des vibrations longitudinales. Mais le mode de propagation étant le même, on pourra figurer par la courbe (*fig.* 454) les positions occupées à un moment donné par les molécules de la corde AB. La distance BB'

Fig. 455.



de deux nœuds semblables sera égale à la longueur d'onde λ, et l'on aura

$$\lambda = a'T, \quad \lambda = \frac{a'}{N}, \quad a' = \lambda N,$$

en désignant par N le nombre des vibrations doubles accomplies en une seconde. Rien ne sera changé que la direction du mouvement vibratoire et la vitesse de transmission.

On peut réaliser ce mouvement en tendant un long tube de caoutchouc horizontalement et en agitant à la main un de ses bouts. Si on le soulève et l'abaisse alternativement, on voit des ondes se succéder, qui reproduisent la courbe de la *fig.* 454 et se propagent avec une vitesse assez petite. On peut opérer de la même manière avec une longue corde déposée sur le sol; mais le meilleur exemple est offert par les liquides. Imaginons une longue gouttière pleine d'eau, et agitons cette eau à l'une des extrémités par une vibration imprimée de haut en bas à un flotteur, nous verrons des ondes soulevées et abaissées se transmettre régulièrement à la surface. La hauteur du niveau, à un moment donné, figurera la courbe (*fig.* 454). Cette courbe se transmettra parallèlement à elle-même, d'un mouvement uniforme avec une certaine vitesse a', et l'on constatera qu'elle marche de λ pendant la durée T.

II. — DANS UN MILIEU INDÉFINI.

Considérons maintenant dans un milieu indéfini une sphère A (*fig.* 456) se dilatant et se contractant alternativement de façon que chaque élément m de sa surface exécute les mêmes vibrations que précédemment. Elles se transmettront suivant AD, comme dans le cylindre, avec une vitesse a, et la distance λ de deux nœuds voisins B et D sera

Fig. 456.

$$\lambda = \frac{a}{N}.$$

Les mêmes effets se produisant dans toutes les directions, le mouvement se propagera par ondes sphériques $\beta\beta'$, $\gamma\gamma'$, $\delta\delta'$,..., alternativement con-

densées et dilatées, séparées par des sphères en repos BB′, CC′, DD′,..., l'intervalle des sphères BB′, DD′ est égal à λ.

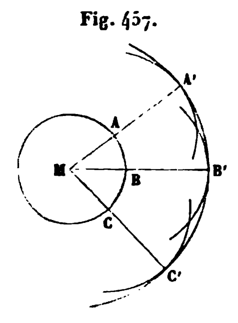
Intensité. — La seule différence est que le son émis par A vient successivement se répartir sur les sphères concentriques de rayons $r, r', r'',\ldots$, c'est-à-dire sur les surfaces $4\pi r^2$, $4\pi r'^2$, $4\pi r''^2,\ldots$; et, en désignant par $i, i', i'',\ldots$, les quantités de son reçues sur l'unité de surface ou les *intensités* du son, il faudra que l'on ait

$$4\pi r^2 i = 4\pi r'^2 i' = 4\pi r''^2 i'',\ldots,$$

ce qui montre que les intensités sont en raison inverse du carré des distances.

Mécanisme de la propagation. — Pour expliquer la propagation de ces mouvements par ondes sphériques, on suppose que tous les points d'une sphère ABC primitivement ébranlée (*fig.* 457) deviennent des centres sonores; qu'ils émettent des ondes particulières égales, dont l'enveloppe est la sphère résultante A′B′C′, sur laquelle le son arrive après un temps donné. On remarquera que le mouvement qui atteint le point B′ vient de B, ce qui montre que le son arrive en ligne directe de M en B′ en passant par B.

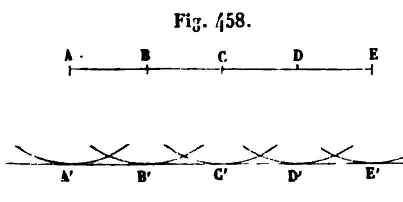
Fig. 457.



Ces raisonnements s'appliquent indifféremment aux vibrations longitudinales et transversales. On peut avoir une représentation exacte de celles-ci sur la surface d'un lac dont on agite un point. On voit alors naître des cercles concentriques, les uns surélevés, les autres affaissés, qui se poursuivent, et qui, atteignant successivement un point tel que A, lui impriment des oscillations sensiblement verticales pendant que la propagation du mouvement se fait suivant le rayon MA (*fig.* 457).

Supposons qu'on ébranle à la fois une série de points A, B, C, D, E (*fig.* 458) situés en ligne droite. Chacun est un centre d'ébranlement qui émet des ondes circulaires, lesquelles ont une enveloppe A′E′ parallèle à AE. On ne voit, en réalité, que cette enveloppe qui se propage.

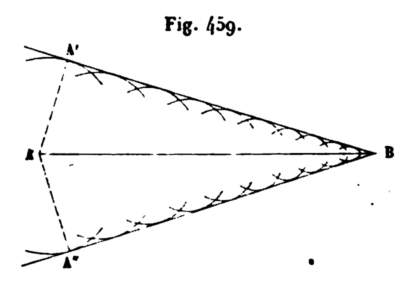
Fig. 458.



Quand la proue d'un navire s'avance sur l'eau de A en B (*fig.* 459), elle

ébranle successivement tous les points de AB, qui émettent alors des ondes qui se propagent. A un moment donné, les rayons de ces ondes sont proportionnels au temps depuis lequel elles ont été produites, c'est-à-dire à la distance de leur centre au point B; elles sont arrivées sur deux lignes droites BA', BA'' : c'est le *sillage* du navire. Si la vitesse de ce navire était égale à celle de la propagation des ondes, elles passeraient toutes à la fois en B, c'est-à-dire que les deux lignes A'B et A''B formeraient une seule droite normale à AB.

Fig. 459.



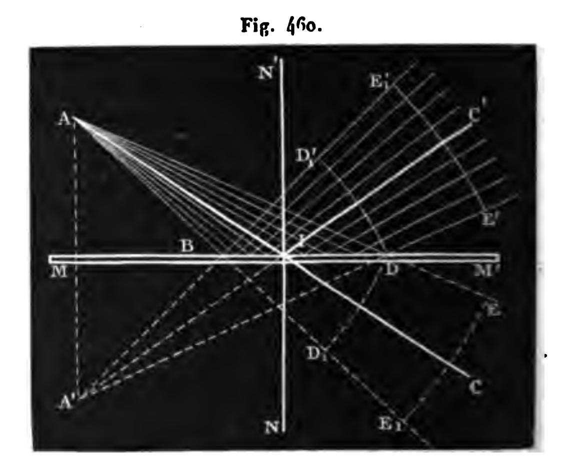
Ces exemples montrent comment l'onde définitive n'est que l'enveloppe d'une série d'ondes partielles émises par chaque point.

On reviendra sur ce sujet dans l'optique.

III. — RÉFLEXION DES ONDES SONORES.

Soit A (*fig.* 460) l'origine d'un son. Au bout d'un temps t il sera arrivé sur une sphère EE_1. Mais supposons qu'il ait rencontré une surface élastique BD. Il en ébranlera les différents points, qui deviendront des centres

Fig. 460.



sonores. Au bout du temps t, le point B aura envoyé le mouvement jusqu'à une distance égale à BE_1, c'est-à-dire sur une sphère de rayon égal à BE'_1; le point D sur une sphère de rayon DE, et ainsi de suite; toutes seront tangentes à EE_1; elles le seront aussi à une autre sphère $E'E'_1$ symétrique, et qui pourra être considérée comme décrite d'un point A' symétrique de A. Cette onde $E'E'_1$ est le mouvement réfléchi; et si l'on considère un faisceau très-petit AI, on voit qu'il se réfléchit suivant IC', et que *l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion.* Tout se passe comme si le son réfléchi venait d'un point A' situé derrière l'obstacle BD et symétrique de A : A' est l'image sonore du point A.

Lorsque le son se réfléchit sur une surface quelconque, la loi que nous venons de trouver subsiste toujours : le rayon incident et le rayon réfléchi font des angles égaux avec la normale à la surface réfléchissante. On s'explique ainsi les effets sonores de certaines voûtes. Le moindre bruit que l'on produit à l'un des foyers d'une voûte ellipsoïdale s'entend distinctement à l'autre foyer, parce que les rayons que l'on peut mener d'un point quelconque d'une ellipse à ses deux foyers font des angles égaux avec la normale érigée au même point. C'est sur des phénomènes de ce genre que reposent les effets des cabinets parlants, etc.

Échos. — La route que parcourt le son qui a été réfléchi et qui arrive ensuite à un point quelconque est toujours plus longue que la ligne droite suivie par le son direct; il s'ensuit que le premier est toujours en retard sur le second.

Quand l'obstacle qui réfléchit le mouvement est peu éloigné, le retard est à peine sensible, et les sons réfléchi et direct se confondent; mais si la distance est assez grande, ils se séparent, il y a répétition; c'est le phénomène des échos. Plusieurs parois réfléchissantes déterminent plusieurs répétitions successives : l'écho est multiple.

Supposons que les obstacles soient disposés de telle sorte que les sons réfléchis reviennent au point de départ. Dans ce cas, l'écho sera distinct si le son met, pour aller et revenir, un temps au moins égal à sa durée propre. Pour prononcer une syllabe, il faut environ $\frac{1}{5}$ de seconde; pendant ce temps, le son parcourt $\frac{340}{5}$ ou 68 mètres; il peut revenir d'un obstacle éloigné de 34 mètres; c'est la distance nécessaire pour obtenir un écho monosyllabique. Une distance double donne un écho de deux syllabes, et ainsi de suite. Un écho double nécessite un second obstacle deux fois plus éloigné, un écho triple un troisième obstacle placé à une distance triple, etc. Il est d'ailleurs évident qu'on peut ainsi obtenir des échos multiples par des réflexions successives entre deux surfaces seulement.

Porte-voix. — Cornet acoustique. — Le porte-voix a pour but de remédier à l'affaiblissement que le son éprouve en se propageant dans un milieu indéfini. C'est d'ordinaire un tube conique de carton ou de métal. On applique les lèvres dans l'embouchure, et l'on parle dans le tube en le dirigeant vers le point où l'on veut se faire entendre. Le pavillon est évasé et contribue beaucoup à augmenter l'intensité du son ou la portée de l'instrument. L'effet des porte-voix ne s'explique que très-imparfaitement par la réflexion des ondes sonores à l'intérieur des parois du tube.

Le cornet acoustique a pour objet de concentrer dans l'oreille le mouvement sonore éparpillé sur une grande surface. On lui donne des formes très-diverses, qui ne sont justifiées par aucune théorie. La plus simple est celle du porte-voix renversé; l'extrémité étroite du tube conique est appliquée dans l'oreille et le pavillon dirigé vers le point d'où vient le son. Le mouvement vibratoire de la masse d'air contenue dans le pavillon se trouve ainsi concentré dans des sections de plus en plus petites et, par suite, gagne en énergie ce qu'il perd en étendue.

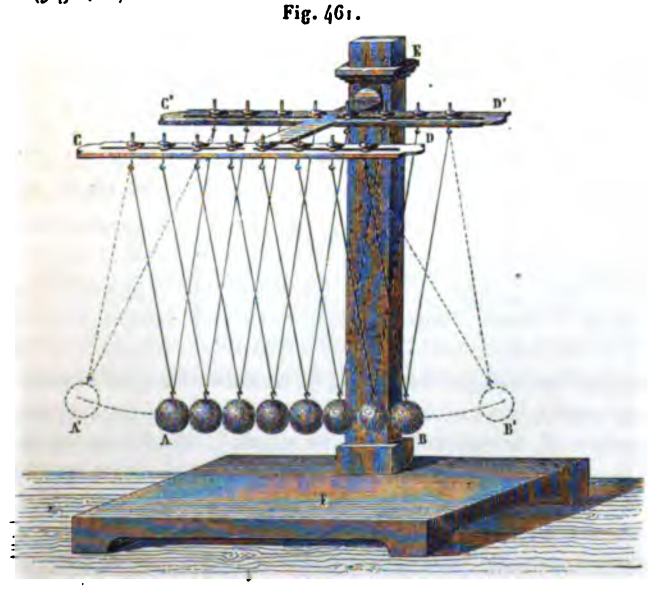
CHAPITRE III.

VIBRATIONS LONGITUDINALES.

I. — RÉFLEXION AUX EXTRÉMITÉS D'UN CYLINDRE.

Avant d'aborder l'étude du mouvement vibratoire dans les cylindres, il convient de revenir au cas des billes élastiques, qui est tout à fait analogue (*fig.* 461) :

Fig. 461.



1° On soulève la première bille A jusqu'en A′ et on la laisse tomber; elle perd toute sa vitesse, et la donne à la seconde, qui la transmet à la troisième, et ainsi de suite, et, chacune restant au repos, il n'y a aucun mouvement de retour vers A.

2° Si la dernière bille B est appuyée sur un obstacle élastique, elle reçoit la vitesse venue de A, mais elle ne la communique pas. Elle en re-

prend une autre égale et contraire, qu'elle cède à l'avant-dernière bille; et il en résulte un mouvement réfléchi de B vers A avec *un changement de signe de la vitesse incidente*.

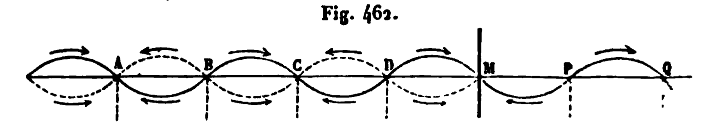
3° Supposons les billes liées par un fil qui les empêcherait de se séparer, et admettons que la dernière B soit appuyée contre une bille plus petite ou qu'elle soit continuée par l'air seul. Quand elle recevra la vitesse incidente, elle la gardera *avec le signe qu'elle avait*. Alors elle tirera l'avant-dernière bille, celle-ci la précédente; ce sera un mouvement réfléchi de B vers A, *sans changement de signe de la vitesse incidente*.

Or ce qui se passe dans la série des billes se produit dans la série des tranches d'un cylindre ébranlé par un bout et terminé à l'autre soit par un obstacle résistant, soit par une tranche libre; dès lors, nous admettrons que, dans un cylindre de substance quelconque, il y aura à l'extrémité réflexion de la vitesse incidente, avec changement de signe si cette extrémité est fixée, sans changement de signe si elle est libre.

Réflexion avec changement de signe. — Considérons le premier genre de réflexions. Admettons que la partie antérieure du cylindre soit en mouvement vibratoire continu; elles se réfléchiront en M et chaque point sera animé de la somme des vitesses des ondes directes et réfléchies.

Représentons les vitesses incidentes par la courbe pleine ABCD (*fig.* 462),

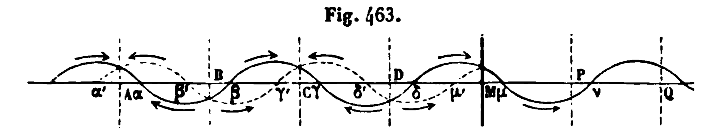
Fig. 462.



marquons leur sens par des flèches, et prenons d'abord le moment où un nœud, c'est-à-dire une intersection de la courbe avec son axe, rencontre l'extrémité M du cylindre. Avant ce moment, les vitesses représentées par la courbe prolongée MPQ sont venues successivement rencontrer le point M, y changer de signe, et partant de là, se propager en sens inverse de M vers A; elles peuvent donc être figurées, mais avec des vitesses contraires, par une courbe ponctuée MDCA, symétrique de MPQ; le mouvement vibratoire simultané des diverses tranches est égal à la somme des vitesses représentées par les ordonnées des deux courbes pleine et ponctuée. On voit qu'il est nul aux points M, D, C, B, A, dont les distances sont égales à une demi-longueur d'onde; qu'il est dirigé de D en M dans l'espace DM, de D en C dans DC, et qu'en général il est de direction opposée dans chaque demi-longueur d'onde consécutive comptée à partir de M.

Si le temps croît, la courbe des mouvements incidents s'avance d'une certaine quantité (*fig.* 463); celle des mouvements réfléchis marche aussi

Fig. 463.



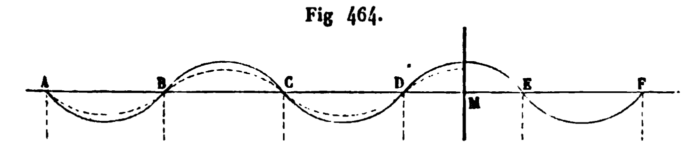
d'une même quantité en sens contraire. Alors la figure montre que les mêmes points M, D, C, B, A possèdent des vitesses égales et contraires qui se détruisent, mais qui déterminent une compression en A, une dilatation en B, etc.

Les tranches M, D, C, B, A sont donc toujours au repos, mais elles éprouvent des condensations et des dilatations alternatives. Ce sont des *nœuds*. Au contraire, les milieux de leurs intervalles (les internœuds) sont en mouvement tantôt dans un sens, tantôt dans un autre; ce sont des *ventres*. Là, il n'y a ni compression ni dilatation. Les nœuds sont à des distances de l'extrémité M égales à $\frac{2\lambda}{4}, \frac{4\lambda}{4}, \frac{6\lambda}{4}$, c'est-à-dire à des distances paires de $\frac{\lambda}{4}$, les ventres à des distances impaires.

Expériences de N. Savart. — Ces conséquences théoriques ont été vérifiées par N. Savart. Il avait placé devant une muraille un timbre qu'on faisait vibrer. Les rayons tombant normalement se réfléchissaient vers le timbre, et la superposition des mouvements directs et réfléchis produisait des nœuds et des ventres. En mettant l'oreille à ceux-ci, on entendait le son; en la transportant aux nœuds, on remarquait un grand affaiblissement.

Réflexion sans changement de signe. — Si le cylindre considéré est terminé en M par une extrémité libre, l'onde réfléchie sera symétrique de la courbe prolongée EF (*fig.* 464); mais les vitesses n'auront point

Fig 464.

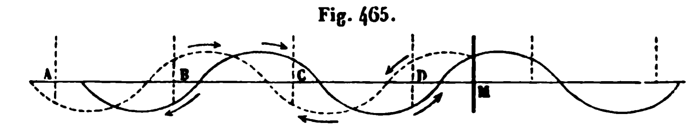


changé de signe, et la figure montre qu'elles s'ajoutent aux vitesses directes en M et dans les espaces DC, CB, BA, que le mouvement est nul en D à $\frac{\lambda}{4}$ de l'extrémité M où se trouve un premier nœud, et qu'il en est

de même en C, B, A à des distances de M égales à $\frac{3\lambda}{4}$, $\frac{5\lambda}{4}$, $\frac{7\lambda}{4}$, etc., c'est-à-dire à des distances impaires de $\frac{\lambda}{4}$.

Si le temps croît, l'onde directe marche vers la paroi et l'onde réfléchie s'en éloigne d'une même quantité (*fig.* 465). Par suite, les deux

Fig. 465.

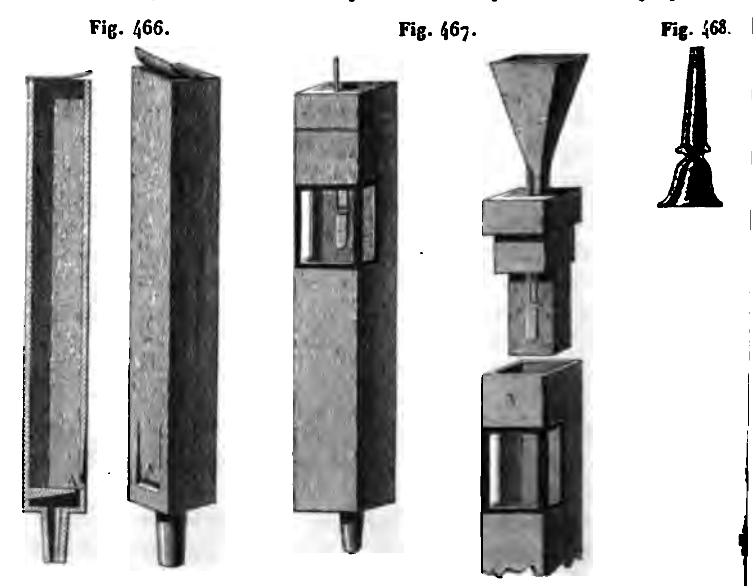


vitesses sont toujours égales et contraires aux points D, C, B, A, où se trouvent des nœuds fixes; elles sont, au contraire, toujours égales et de même signe en M et aux milieux des espaces DC, CB, BA, qui sont des ventres. Ce dernier cas ne diffère donc du précédent que par la situation des nœuds et des ventres.

II. — LES TUYAUX SONORES.

La théorie précédente va nous permettre de prévoir et d'expliquer les

Fig. 466. Fig. 467. Fig. 468.

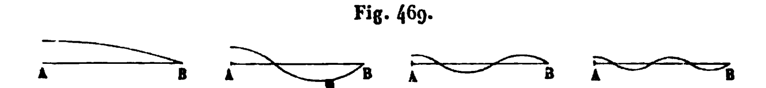


lois des tuyaux sonores. Ces instruments sont des tubes formés par des

parois suffisamment rigides de nature quelconque et contenant une masse d'air qu'on met en vibration au moyen d'*embouchures* à travers lesquelles on souffle. L'embouchure de flûte est un simple biseau A (*fig.* 466) sur lequel le jet de gaz se brise en deux courants alternatifs, l'un qui pénètre dans le tuyau, l'autre qui s'échappe au dehors. Souvent on emploie des anches vibrantes, c'est-à-dire des lames élastiques que l'air soulève, qui retombent par leur élasticité et qui permettent ou interceptent le passage du gaz. On en voit un exemple dans la *fig.* 467. C'est par des anches vibrantes que l'on fait parler le hautbois, la clarinette et le basson. Enfin, tous les instruments de cuivre s'embouchent par un petit entonnoir où l'on applique les lèvres, lesquelles en vibrant l'une contre l'autre produisent un courant intermittent (*fig.* 468).

Tuyaux fermés. — Considérons d'abord un tuyau ouvert à son embouchure A et fermé à son extrémité B (*fig.* 469). 1° Il est clair, d'après

Fig. 469.



la théorie précédente, que les vibrations incidentes se réfléchiront en B avec changement de signe de leurs vitesses, et qu'elles détermineront dans le tuyau une série de nœuds dont le premier sera en B et qui se succéderont à des distances égales à la demi-longueur d'onde $\frac{\lambda}{2}$. 2° Il est évident que le tuyau ne pourra parler que si les vitesses réfléchies, revenues en A, sont concordantes avec celles que l'embouchure détermine au même point et au même moment; car si cela n'était pas, les vibrations réfléchies tendraient à détruire celles qui déterminent tout le mouvement qui alors n'aurait pas lieu. Il faut donc qu'il y ait un ventre en A. Par conséquent, les sons donnés par le tuyau devront avoir des longueurs d'onde λ telles qu'il y ait toujours un nœud en B, un ventre en A; mais il pourra y avoir 1, 2, 3,... nœuds entre B et A, à des distances de B égales à un multiple pair de $\frac{\lambda}{4}$.

La longueur L du tuyau devra donc être un multiple impair de $\frac{1}{4}\lambda$:

$$L = (2n - 1)\frac{\lambda}{4},$$

et en remplaçant λ par $\frac{a}{N}$, les nombres de vibrations doubles de tous les

sons que peut rendre un tuyau fermé sont donnés par la formule

$$N = (2n - 1)\frac{a}{4L}.$$

En donnant à n les valeurs 1, 2, 3,..., on trouve que les notes du tuyau fermé sont

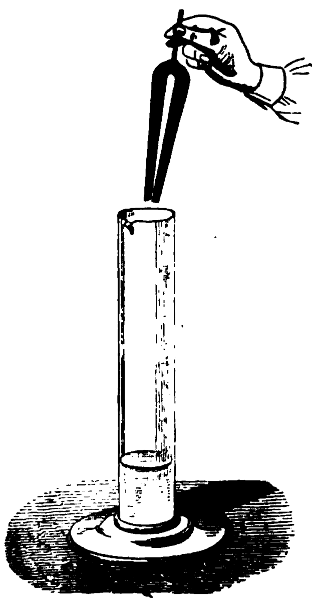
$$\frac{a}{4L}, \quad \frac{3a}{4L}, \quad \frac{5a}{4L}, \ldots.$$

La première est la *note fondamentale*, les autres sont des harmoniques; elles forment la série des nombres impairs 1, 3, 5,.... Si la note fondamentale est ut_1, cette série devient

$$ut_1, \; sol_2, \; mi_3, \ldots.$$

On peut vérifier ces résultats par diverses expériences, par exemple, en faisant vibrer au-dessus d'une éprouvette à pied (*fig.* 470) un diapason dont la note est N. Généralement le tuyau ne répond pas; mais en y versant de l'eau, on en diminue peu à peu la longueur, et quand elle est devenue égale à celle d'un tuyau fermé qui donnerait la note N, l'éprouvette résonne.

Fig. 470.



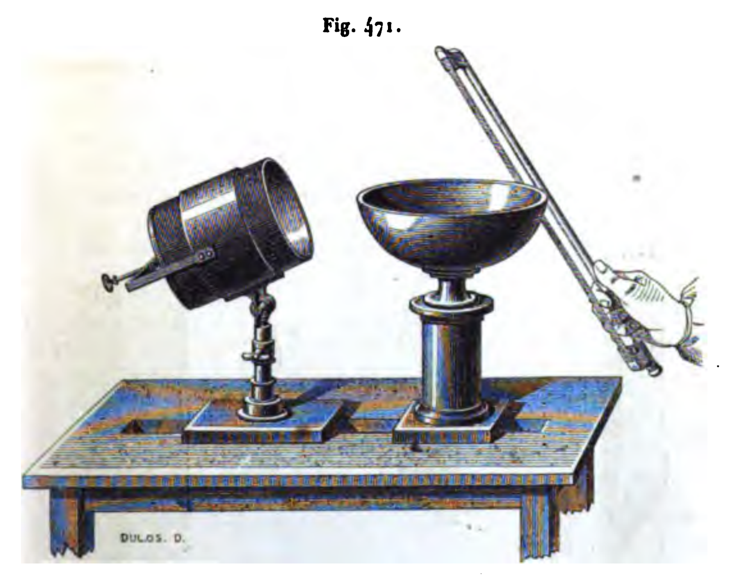
On fait la même expérience en disposant tout près d'un timbre en vibration (*fig.* 471) un tuyau à fond mobile qui détermine un renforcement remarquable du son, lorsque sa longueur est convenable.

La formule $N = \frac{(2n-1)a}{4L}$ fait voir que, pour un même mode de division, le nombre de vibrations N est en raison inverse de L. Il s'ensuit, et l'expérience le confirme, que les longueurs des tuyaux fermés qui donnent la gamme sont proportionnelles aux nombres

$$1, \; \frac{8}{9}, \; \frac{4}{5}, \; \frac{3}{4}, \; \frac{2}{3}, \; \frac{3}{5}, \; \frac{8}{15}, \; \frac{1}{2}.$$

Tuyaux ouverts. — Lorsqu'un tuyau est ouvert dans l'air par son extrémité B, l'air ambiant, qui peut se dilater en tous sens, oppose une

Fig. 471.



résistance moindre que celle des couches intérieures ; il y a donc réflexion sans changement de signe, et il se forme un ventre à l'extrémité B opposée à l'embouchure. Mais, pour que le tuyau parle, il faut qu'il y ait un ventre à chaque extrémité. Par conséquent, la longueur L de ce tuyau devra être un multiple pair de $\frac{\lambda}{4}$,

$$L = 2n\frac{\lambda}{4} = 2n\frac{a}{4N}, \quad N = 2n\frac{a}{4L}.$$

Si l'on suppose $n = 1, 2, 3, \ldots$, les nœuds sont disposés comme dans la

Fig. 472.

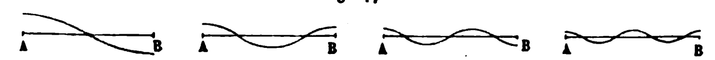


fig. 472, et les valeurs de N sont

$$N = \frac{2a}{4L}, \quad 2\frac{2a}{4L}, \quad 3\frac{2a}{4L}, \ldots$$

1° Les notes d'un tuyau ouvert sont représentées par la série des

nombres naturels : 1, 2, 3, 4,..., ou par la série complète des harmoniques. En supposant que le son fondamental soit ut_1, ces notes seront

$$ut_1,\quad ut_2,\quad sol_2,\quad ut_3,\quad mi_3,\ldots$$

2° Le son fondamental $\frac{2a}{4L}$ est à l'octave de $\frac{a}{4L}$, celui qui serait produit par un tuyau fermé de même longueur. En d'autres termes, un tuyau fermé donne la même note fondamentale qu'un tuyau ouvert de longueur double. C'est ce que l'on vérifie (*fig.* 473) en faisant glisser dans le milieu B d'un tuyau ouvert une coulisse *b* mi-partie pleine et évidée, qui en

Fig. 473. Fig. 474.

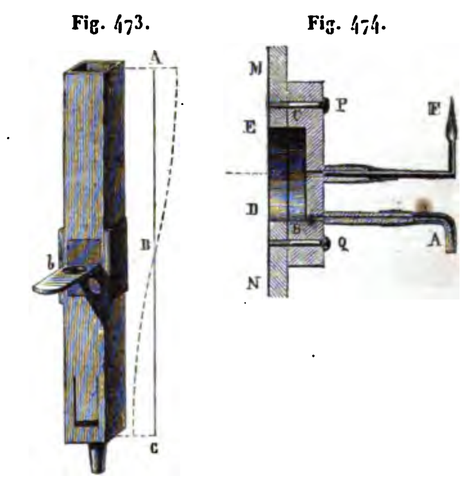


Fig. 475.



fait à volonté ou un tuyau fermé de longueur 1, ou un tuyau ouvert de longueur 2 sans que le son soit changé.

On doit à M. Kœnig un moyen de prouver l'existence et de vérifier la position des nœuds dans les tuyaux sonores. La paroi MN (*fig.* 474) est percée, à l'endroit où doit se former un nœud, d'un trou ED, qui est rebouché par une membrane flexible CB; celle-ci est recouverte par une capsule de bois CBPQ, dans laquelle circule un courant de gaz de l'éclairage qui arrive par A et qu'on allume à sa sortie F. Quand le tuyau parle et qu'il y a une compression au nœud, la membrane est chassée vers l'inté-

rieur de la capsule, comprime le gaz, et la flamme F s'élève; quand il y a dilatation, CB est attirée vers l'intérieur du tuyau, il se fait un vide partiel, la flamme décroît, et, si on l'a convenablement réglée, elle s'éteint. Placée vis-à-vis d'un ventre, la capsule n'éprouve ni dilatation ni compression, et la flamme demeure immobile.

La *fig.* 475 représente un tuyau ouvert, muni de trois capsules manométriques *b*, *a*, *c*, appliquées aux endroits où se forment le nœud du son fondamental et les deux nœuds de son octave. Lorsqu'on produit cette octave, les deux flammes extrêmes *a* et *c* entrent en vibration et s'éteignent, pendant que celle du milieu *b*, située sur un ventre de vibration, reste tranquille. Si l'on donne le son fondamental, c'est la flamme du milieu qui s'agite et disparaît.

Quand les flammes sont alimentées par un courant de gaz rapide, elles ne s'éteignent pas, mais elles éprouvent aux moments des dilatations et

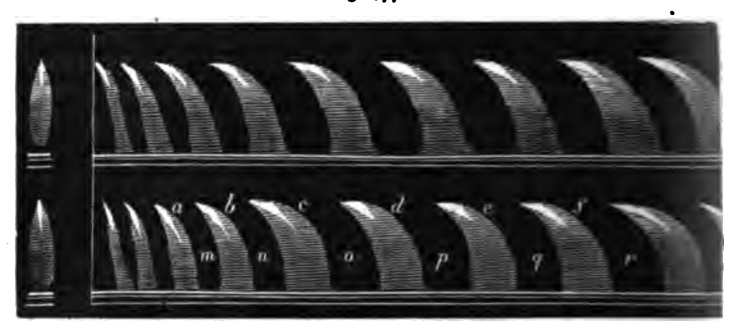
Fig. 476.



des condensations du nœud des diminutions et des augmentations de longueur qu'on n'aperçoit pas à cause de la persistance des impressions; mais

si l'on dispose un miroir tournant C vis-à-vis des tuyaux A, A (*fig.* 476), munis de capsules manométriques, les images M des flammes *a*, *a'* forment deux lignes parallèles et paraissent alternativement élevées et raccourcies (*fig.* 477). Vis-à-vis des ventres, les mêmes flammes donneraient des images continues et toujours d'égale hauteur.

Fig. 477.



Instruments à vent. — Dans les jeux d'orgue, les divers tuyaux donnent le son fondamental, et il y en a autant que de notes à produire. Mais dans les instruments où l'on souffle par la bouche, il n'y a qu'un seul tuyau auquel on fait rendre les notes de la gamme par divers artifices.

Le cor est constitué par un tube de cuivre très-long contourné sur lui-même; il ne donne point le son fondamental, mais les harmoniques

$$8,\quad 9,\quad 10,\quad 11,\quad 12,\quad 13,\quad 14,\quad 15,\quad 16$$

ou

$$1,\quad \frac{9}{8},\quad \frac{5}{4},\quad \frac{11}{8},\quad \frac{3}{2},\quad \frac{13}{8},\quad \frac{7}{4},\quad \frac{15}{8},\quad 2,$$

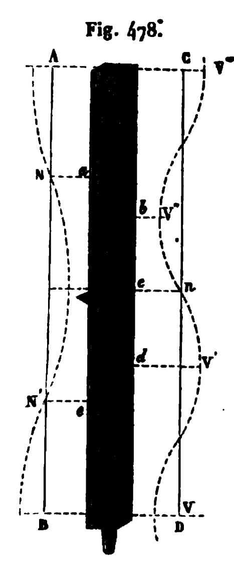
lesquels représentent les notes de la gamme, à l'exception de trois qu'il est nécessaire de modifier très-peu. Cette modification s'obtient en plaçant le poing dans le pavillon, ce qui change un peu la longueur du tuyau.

Le trombonne et le cornet à piston ont une longueur que l'on fait varier soit par une coulisse, soit par des tubes supplémentaires que le jeu des pistons introduit à volonté dans le circuit total.

Tous les autres instruments sont percés de trous latéraux que l'on peut ouvrir ou fermer avec les doigts ou avec des clefs, et dont le rôle est facile à comprendre. En effet, quand on ouvre le tuyau en un point déterminé, on le met en communication avec l'air extérieur, et l'on dé-

termine en ce point les mêmes phénomènes qu'à son extrémité ouverte, c'est-à-dire la formation d'un ventre. Si, par exemple, le tuyau rend le deuxième harmonique ANN'B (*fig.* 478), on ne change rien au son produit en débouchant le trou *c*, puisqu'il y avait déjà un ventre en ce point; mais on le modifie en ouvrant les clefs *e* et *a* qui correspondent à des nœuds. De même, lorsque le tuyau rend le troisième harmonique VV'V''V''', on change le son en ouvrant l'un des orifices *a*, *c*, *e*, mais on ne le fait pas varier en débouchant les trous *b* et *d*.

Fig. 478.



La flûte, qui a pour son fondamental un *ré*, porte six trous échelonnés convenablement; on produit, en les ouvrant, le même effet que si l'on coupait successivement le tuyau en ces divers trous, et il rend les sons ascendants *ré*, *mi*, *fa*, *sol*, *la*, *si*, ut_2. Si l'on rebouche ces orifices et qu'on force le courant d'air, on fera sortir le premier harmonique $ré_2$, et en recommençant à déboucher successivement les trous, on obtiendra la deuxième gamme commençant à $ré_2$. Pour compléter la série des notes, il n'y a plus qu'à ajouter des clefs intermédiaires qui produiront les dièses et les bémols. Tous les autres instruments à vent sont disposés d'une manière analogue.

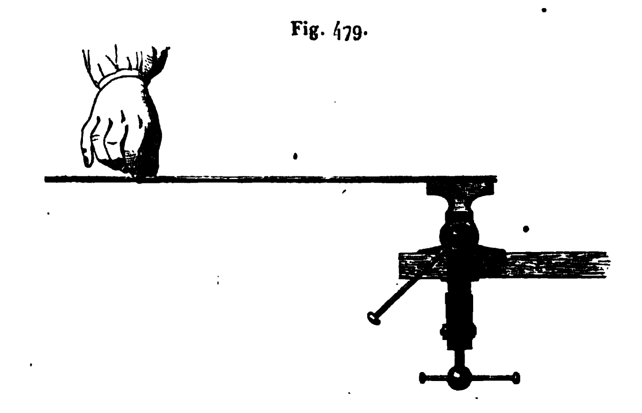
III. — VIBRATIONS LONGITUDINALES DES VERGES ET DES CORDES.

Les lois de la propagation et de la réflexion du son dans un cylindre s'appliquent aussi bien aux solides et aux liquides qu'aux gaz. Quand on plonge un tuyau à embouchure de flûte dans un liquide, il parle comme dans l'air et se divise de la même manière en ventres et nœuds. Il n'y a rien de changé dans les formules, si ce n'est que la vitesse du son *a* prend les valeurs qui correspondent à chaque liquide.

Pour mettre en vibration des cylindres solides, on prend des verges rigides prismatiques de métal, de bois, de verre, etc., ou des cordes flexibles tendues, que l'on frotte légèrement dans le sens de la longueur avec les doigts imprégnés de colophane, et si l'on emploie du verre,

avec une étoffe mouillée (*fig.* 479). Les sons que l'on produit ainsi sont très-purs, ordinairement fort doux et toujours plus élevés que si les

Fig. 479.



mêmes appareils vibraient transversalement. On détermine les divers harmoniques en touchant légèrement l'un des points où doit se former un nœud.

Si la tige est encastrée par un bout, les harmoniques sont donnés par la formule des tuyaux fermés, en mettant pour a la vitesse du son qui convient à la matière de la tige. Quand les deux bouts sont libres, la tige se divise comme les tuyaux ouverts. Lorsqu'il s'agit de cordes tendues, fixées par leurs deux extrémités, la réflexion se fait avec changement de signe à chaque bout, qui devient un nœud, et la corde peut se diviser en un nombre pair de quarts de longueur d'onde, comme il suit (*fig.* 480):

Fig. 480.



Les harmoniques correspondants sont

$$\frac{2a}{4L},\quad 2\,\frac{2a}{4L},\quad 3\,\frac{2a}{4L},\ldots,$$

comme dans le cas d'une tige dont les deux bouts sont libres; il n'y a que la position des nœuds qui soit changée.

CHAPITRE IV.

VITESSE DU SON LONGITUDINAL.

I. — MESURE DIRECTE DE LA VITESSE DU SON.

On a mesuré directement la vitesse du son dans l'air, dans l'eau et dans une conduite de fonte. Les expériences exécutées dans l'air sont très-nombreuses. Les plus célèbres furent faites en 1738 par les membres de l'Académie des Sciences, entre l'Observatoire, Montmartre, Fontenay-aux-Roses et Montlhéry, et en 1822, par le Bureau des Longitudes, entre Montlhéry et Villejuif. On tirait de dix en dix minutes un coup de canon à l'une des stations, on mesurait à toutes les autres le temps écoulé entre l'arrivée de la lumière et l'arrivée du bruit, et on calculait la vitesse du son en divisant la distance par le temps observé. On reconnut ainsi : 1° que la vitesse du son est indépendante de la pression et de l'humidité de l'air ; 2° qu'elle est constante à toute distance, c'est-à-dire que le son se transmet uniformément ; 3° qu'elle augmente avec la température ; 4° qu'elle s'ajoute à la vitesse du vent ou s'en retranche suivant que le vent et le bruit marchent dans le même sens ou en sens contraire ; 5° qu'elle est égale à 333 mètres à la température de zéro et à 340 mètres à 15 degrés ; 6° plus tard, Biot prouva qu'elle est la même pour les sons graves ou aigus.

C'est par le même procédé que Colladon et Sturm ont mesuré en 1827 la vitesse du son dans l'eau, entre deux bateaux amarrés à une distance connue sur le lac de Genève. Le premier supportait une cloche plongée dans l'eau, et un levier coudé, armé à sa base d'un marteau et à son sommet d'une mèche allumée, enflammait un tas de poudre en même temps qu'il frappait la cloche. Au second bateau était fixé un cornet acoustique dont le pavillon plongeait dans l'eau et le sommet dans l'oreille de l'observateur, qui pouvait ainsi mesurer le temps écoulé entre l'apparition du signal lumineux et l'arrivée du son par le liquide. La vitesse cherchée se trouva égale à 1435 mètres à la température de 8°,1, c'est-à-dire quatre fois et demie plus grande que dans l'air.

Elle est encore plus grande dans les solides. Biot l'a mesurée dans un assemblage de 376 tuyaux de fonte qui formaient une longueur totale de

931 mètres. Un marteau frappait à la fois sur un timbre et sur l'une des extrémités du conduit, et l'on entendait à l'autre extrémité deux sons, le premier, transmis par la fonte avec une vitesse inconnue x, le second, transmis par l'air à raison de 340 mètres par seconde. Celui-ci arrivait $2^s,50$ après le premier; or il mettait $2^s,76$ à franchir 931 mètres dans l'air; la différence, ou $0^s,26$, représentait donc le temps employé à parcourir la fonte, et comme il est dix fois et demie moindre que le temps mis à parcourir l'air, il s'ensuit que la vitesse du son dans la fonte est égale à dix fois et demie celle qu'il a dans l'air.

II. — MESURE INDIRECTE DE LA VITESSE DU SON.

Pour trouver la vitesse du son dans les autres substances, il faut se rappeler : 1° qu'entre la longueur d'onde λ, le nombre de vibrations N et la vitesse du son a, on a la relation

$$a = \lambda N;$$

2° qu'un tuyau rempli d'un gaz ou d'un liquide, et qu'une verge solide qui vibre longitudinalement, se partagent en ventres et en nœuds: les internœuds sont égaux à la demi-longueur d'onde de la note N que l'on observe. Si donc on mesure ces internœuds $\frac{\lambda}{2}$ et cette note N, on peut calculer la vitesse du son a pour la substance élastique qui remplit le tuyau ou qui forme la matière de la verge.

Cas des gaz. — Pour mesurer les internœuds, Dulong employait un tuyau cylindrique très-étroit, fermé à son extrémité par un piston que l'on pouvait enfoncer à volonté et dont on mesurait la course. On insufflait un courant d'air assez rapide pour produire un harmonique élevé. Alors il se formait un certain nombre de nœuds à l'intérieur. On enfonçait le piston; quand il y avait un nœud et une concamération de moins, la note redevenait la même, et la course du piston était égale à $\frac{\lambda}{2}$. On déterminait N en faisant vibrer une sirène à l'unisson du tuyau et en comptant ses vibrations.

Pour opérer dans des gaz autres que l'air, Dulong plaçait le tuyau horizontalement dans une caisse de bois traversée par la tige du piston. L'embouchure communiquait avec un réservoir contenant le gaz qui faisait parler le tuyau et remplissait la caisse. Les expériences étaient conduites comme dans l'air; voici les résultats obtenus :

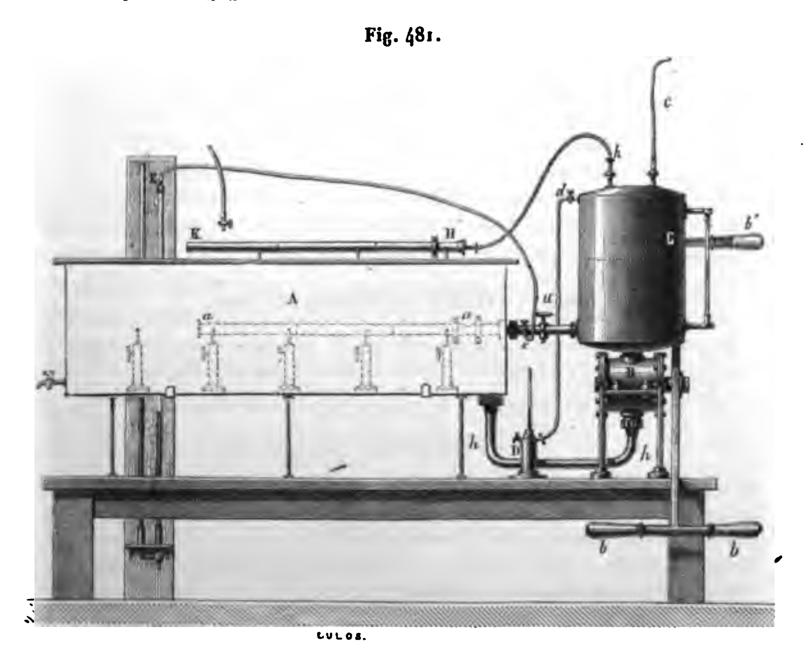
Vitesse du son dans les gaz à la température de zéro.

	a
	m
Air	333,00
Oxygène	317,17
Hydrogène	1269,50
Acide carbonique	261,60
Oxyde de carbone	337,40
Protoxyde d'azote	261,90
Gaz oléfiant	314,00

Cas des liquides. — Wertheim a réussi à faire vibrer des tuyaux à embouchure de flûte en les plongeant dans un liquide et en y injectant un courant du même liquide. Les sons qu'il a obtenus avaient le même caractère musical que dans l'air. Il fut dès lors possible de mesurer la vitesse du son dans les liquides comme on l'avait fait dans les gaz.

Le tuyau *aa* (*fig.* 481) est couché horizontalement dans une cuve A,

Fig. 481.



qui est pleine du liquide qu'on veut étudier. Une pompe à clapets B aspire ce liquide par le conduit *hh* et l'accumule dans un réservoir C, qui com-

munique avec deux manomètres D et E; de là, le liquide s'écoule dans le tuyau *aa* par le robinet *u* que l'on règle à volonté; on peut ainsi obtenir le son fondamental ou un harmonique quelconque. Wertheim mesurait les internœuds par une méthode analogue à celle de Dulong; il trouva que la vitesse du son dans l'eau est égale à 1437 mètres. Voici les résultats obtenus avec quelques autres liquides :

Eau ordinaire	1437^{m}
Eau de mer	1453
Alcool à 36 degrés	1286
Alcool absolu	1160
Éther	1159

Cas des solides. — Pour faire vibrer les solides longitudinalement, on les façonne en tiges, on les fixe par le milieu et les frotte avec un drap enduit de colophane. On mesure, d'une part, la longueur L de la tige, et de l'autre, la note N; la vitesse du son est alors donnée par la formule $a = 2LN$. On a trouvé les nombres suivants, en prenant pour unité la vitesse du son dans l'air :

Argent recuit	8,057
Zinc distillé	9,683
Cuivre recuit	11,167
Platine recuit	8,111
Fer recuit	15,108
Acier recuit	15,108

III. — VITESSE THÉORIQUE DU SON.

Il y a une troisième méthode entièrement théorique pour déterminer la vitesse du son dans les solides. Laplace a montré que cette vitesse est donnée par la formule

$$a = \sqrt{\frac{g}{\varepsilon}},$$

en désignant par g l'accélération due à la pesanteur et par ε l'allongement qu'éprouve une colonne de 1 mètre de la substance considérée, sous l'influence d'une traction égale au poids de cette colonne. Or, comme on peut mesurer ε, on peut calculer a. Les résultats trouvés par cette méthode concordent avec ceux que donnent les deux premières.

CHAPITRE V.

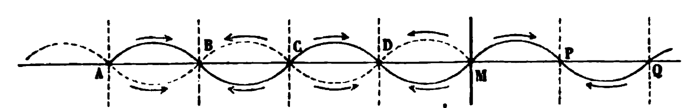
VIBRATIONS TRANSVERSALES.

I. — CAS DES CORDES FLEXIBLES.

Division en internœuds. — Nous avons déjà vu qu'une tige allongée d'un corps solide peut éprouver et transmettre des vibrations transversales, qu'à un moment donné elle prend la forme d'une courbe sinusoïdale, et qu'avec le temps cette courbe se transporte avec une vitesse a'.

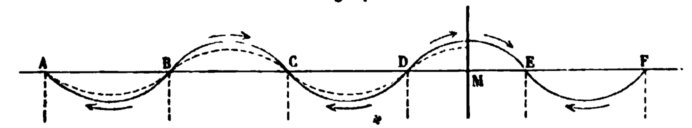
Si la tige est limitée en M (*fig.* 482), elle sera le siége des phénomènes

Fig. 482.



déjà étudiés pour les vibrations longitudinales dans les cylindres d'une longueur finie. Les mouvements se réfléchiront de M vers A et de A vers M de deux manières : 1° avec changement de signe des vitesses vibratoires si l'extrémité considérée A ou M est invariablement fixée : dans ce cas, il y aura des nœuds fixes, à partir de cette extrémité, à toutes les distances multiples pairs de $\frac{\lambda}{4}$; 2° sans changement de signe, si M est libre dans l'air (*fig.* 483) : alors M sera un ventre, et les nœuds seront à des distances de M, qui seront des multiples impairs de $\frac{\lambda}{4}$.

Fig. 483.



Le premier cas est réalisé par toutes les cordes flexibles fixées à leurs extrémités, et en particulier par un long tube en caoutchouc (*fig.* 482)

fixé en M à un mur; en soulevant et en abaissant une seule fois le point A, on fait naître une portion de courbe AB qui se propage jusqu'en M. Elle s'y réfléchit, revient en A, où elle se réfléchit de nouveau, et ainsi de suite. Donnons maintenant au bout A une suite de secousses semblables, convenablement réglées, le tube prend une oscillation régulière, nous voyons se former $(n - 1)$ nœuds également espacés en M, D, C,..., et la longueur AM se partage en un nombre entier n d'internœuds ou en un nombre pair $2n$ de quarts de longueur d'onde,

$$L = 2n\frac{\lambda}{4} = \frac{2n}{4}\frac{a'}{N}.$$

On tire de là

$$N = 2n\frac{a'}{4L}.$$

Discussion. — Pour un rhythme convenable et très-lent, on voit l'oscillation s'établir et se continuer régulièrement sans qu'il y ait aucun nœud entre A et X; la corde vibre alors dans sa totalité et prend alternativement les formes AaX et AbX (*fig.* 484); dans ce cas, $n = 1$. Si l'on précipite ou qu'on ralentisse un peu la mesure, le mouvement de la corde devient discontinu et irrégulier.

Fig. 484.

Donnons à la corde un mouvement deux fois plus rapide; nous verrons se produire un nœud au milieu B (*fig.* 485), qui demeure immobile pendant que la forme générale de la courbe passe alternativement de AaBa'X à AbBb'X. Si l'on agite le tube trois, quatre, cinq,... fois plus vite, il y a trois, quatre,... internœuds, comme le représente la *fig.* 486.

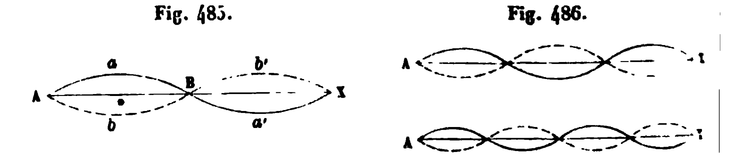
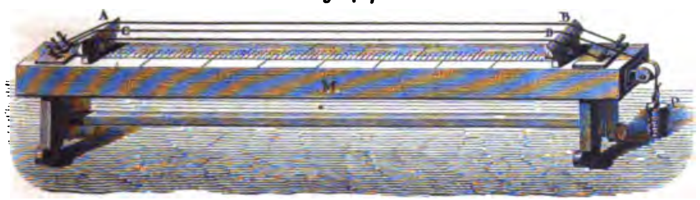


Fig. 485. Fig. 486.

Sonomètre. — Tels sont les modes de vibration qu'une corde flexible quelconque puisse accepter. A mesure que cette corde diminue de longueur ou que sa tension augmente, le rhythme s'accélère et le nombre des vibrations peut devenir suffisant pour donner un son perceptible. Pour étudier ce son, on tend les cordes sur un instrument composé d'une caisse vide

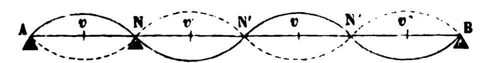
de sapin (*fig.* 487) qui est destinée à la fois à les supporter et à renforcer leur son. On accroche une des extrémités à une broche de fer; on les fait passer sur la gorge d'une poulie et on les charge par un poids P.

Fig. 487.



Elles s'appuient sur deux chevalets A et B, à arêtes vives, qui réduisent la partie vibrante à la longueur de 1 mètre. On met ces cordes en vibration en les frappant avec un petit marteau de bois garni de peau, ou en les pinçant avec les doigts, ou enfin en les frottant avec un archet. Elles peuvent donner les mêmes modes de division que le tube de caoutchouc. Le son fondamental s'obtient spontanément; pour faire sortir les autres, il suffit de fixer par une pression légère un des points qui doit être un nœud et d'ébranler avec l'archet une partie qui doit devenir un ventre, la décomposition en parties aliquotes se produit à l'instant, et une fois qu'elle est commencée, on peut cesser de presser le nœud qui a été fixé et continuer le mouvement de l'archet sans que le son change. Fixons, par exemple, le point N qui est au quart de la longueur totale (*fig.* 488);

Fig. 488.



et pour rendre sensible aux yeux la division de la corde, mettons des chevalets de papier blanc aux points N' et N'' qui doivent être des nœuds, et d'autres chevalets d'une autre couleur au milieu des ventres v', v'', v'''. Aussitôt que nous donnerons un coup d'archet en v, tous les derniers seront chassés au loin par le mouvement de v', v'', v''', mais les premiers resteront à leur place puisque les nœuds N', N'' sont immobiles.

Lois des vibrations des cordes. — La formule $N = 2n\dfrac{a'}{4L}$ montre que si la corde se divise en 1, 2, 3,... internœuds, N est toujours proportionnel à leur nombre, et que les harmoniques de la corde suivent la série des nombres naturels. L'expérience confirme cette déduction. Il suffira

donc de trouver la loi du nombre N des vibrations du son fondamental qui répond à $n = 1$:

$$N = \frac{a'}{2L}.$$

Pour cela il faut connaître la vitesse de propagation a' des vibrations transversales. A la vérité, on ne l'a pas mesurée expérimentalement, mais le calcul donne $a' = \sqrt{\frac{gP}{sd}}$, en désignant par g la gravité, par P, s, d, le poids tenseur, la section et la densité de la corde. Il vient alors

$$N = \frac{1}{2L}\sqrt{\frac{gP}{sd}}.$$

1° Plaçons sous cette corde un chevalet supplémentaire, et faisons-le glisser de manière que la longueur de la partie vibrante devienne

$$1, \quad \frac{8}{9}, \quad \frac{4}{5}, \quad \frac{3}{4}, \quad \frac{2}{3}, \quad \frac{3}{5}, \quad \frac{8}{15}, \quad \frac{1}{2},$$

elle rend les notes de la gamme

ut, *ré*, *mi*, *fa*, *sol*, *la*, *si*, ut_2;

par conséquent, *les nombres de vibrations* N *sont en raison inverse de la longueur* L.

2° Quatre cordes de même matière, tendues par le même poids P, et dont les rayons varient comme les nombres 4, 3, 2, 1, produisent les notes ut_1, fa_1, ut_2, ut_3, dont les rapports sont $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{2}$, 1. Donc N *est en raison inverse des rayons ou de la racine carrée des sections* s.

3° Chargeons la corde par des poids égaux à 1, 4, 9, 16, ..., elle rendra des sons ut_1, ut_2, sol_2, ut_3, qui correspondent aux nombres 1, 2, 3, 4. Donc N *est proportionnel à la racine carrée du poids tenseur* P.

4° On tend deux cordes de même section et de nature différente avec les mêmes poids, et on cherche les longueurs L et L' qui sont à l'unisson. on trouve que $\frac{L}{L'} = \sqrt{\frac{d}{d'}}$; et, comme $\frac{L}{L'} = \frac{N'}{N}$, on a $\frac{N'}{N} = \sqrt{\frac{d}{d'}}$, c'est-à-dire que *les nombres de vibrations sont en raison inverse de la racine carrée des densités*.

La formule des cordes étant ainsi vérifiée, on peut se servir du sonomètre pour déterminer le nombre des vibrations effectuées pendant une seconde par un son quelconque. Supposons, par exemple, que la longueur initiale de la corde du sonomètre soit égale à 1 mètre et qu'on l'ait tendue

jusqu'à la mettre à l'unisson avec le diapason; elle fait alors 435 vibrations par seconde; mais en l'allongeant ou en la raccourcissant jusqu'à une longueur L, on pourra lui faire rendre le son que l'on veut apprécier, et ce son correspondra à $\frac{435}{L}$ vibrations par seconde. C'est par ce procédé, imaginé par Mersenne, que dans la plupart des cas on évalue les sons.

Rapport des vibrations longitudinales et transversales. — Lorsqu'une corde vibre longitudinalement, on a $N = \frac{a}{2L}$, et lorsqu'elle vibre transversalement, $N' = \frac{a'}{2L}$. Par conséquent, les nombres N et N' sont dans le rapport des vitesses a et a'. Or, nous avons vu que $a = \sqrt{\frac{g}{\varepsilon}}$ et $a' = \sqrt{\frac{gP}{sd}}$; donc

$$\frac{N'}{N} = \frac{a'}{a} = \sqrt{\frac{\varepsilon P}{sd}}.$$

Ici, ε est l'allongement qu'éprouve une corde de longueur 1 lorsqu'elle est tendue par un poids égal au sien, c'est-à-dire égal à sd. Le poids P produit un allongement e, et comme l'allongement est proportionnel au poids tenseur, nous avons $\frac{e}{\varepsilon} = \frac{P}{sd}$, et

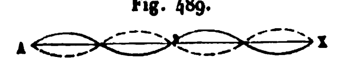
$$\frac{N'}{N} = \sqrt{e}.$$

Le rapport des vibrations transversales et longitudinales est égal à la racine carrée de l'allongement que l'unité de longueur de la corde éprouve par l'effet du poids P *qui la tend.* Ainsi, N, N', e, a, a' sont liés par des relations simples qui permettent de trouver trois de ces quantités quand on en connaît deux.

II. — CAS DES VERGES RIGIDES.

Division en internœuds. — A mesure que les cordes perdent de leur flexibilité, les nœuds se déplacent et leurs distances cessent d'être égales; en même temps, les sons qu'elles rendent sont plus élevés. A ces différences près, les modes de division restent disposés de la même manière. Quand les cordes sont devenues rigides, elles prennent le nom de *verges*.

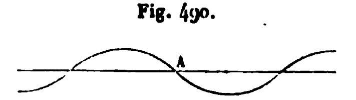
Fig. 489.



1° Les verges encastrées ou soutenues par leurs bouts se divisent comme les cordes (*fig.* 489);

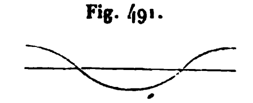
2° Si on les fixe par le milieu A, elles offrent un nœud en ce point et des ventres aux extrémités (*fig.* 490);

Fig. 490.



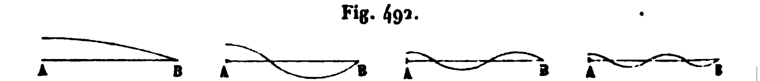
3° On peut les soutenir par deux points à égale distance des extrémités, et convenablement choisis, ce qui donne pour le son fondamental la division suivante :

Fig. 491.



4° Quand la verge est fixée par un bout B, l'autre A étant libre il y a un ventre à cette extrémité libre, un nœud à l'extrémité fixe, et les internœuds sont disposés comme dans les tuyaux fermés.

Fig. 492.



Loi des vibrations des verges. — Quels que soient leurs modes d'encastrement et de division, pourvu qu'ils soient les mêmes, les nombres de vibrations des verges sont proportionnels à leur épaisseur et en raison inverse du carré de leur longueur, mais indépendants de la largeur :

$$N = K \frac{e}{l^2}.$$

D'où il suit : 1° que si deux verges de même substance et de même longueur ont des épaisseurs 1 et 2, la deuxième donne l'octave de la première; 2° que si on en prend une série dont les longueurs sont

$$\sqrt{1},\quad \sqrt{\frac{9}{8}},\quad \sqrt{\frac{5}{4}},\quad \sqrt{\frac{4}{3}},\quad \sqrt{\frac{3}{2}},\quad \sqrt{\frac{5}{3}},\quad \sqrt{\frac{15}{8}},\quad \sqrt{2},$$

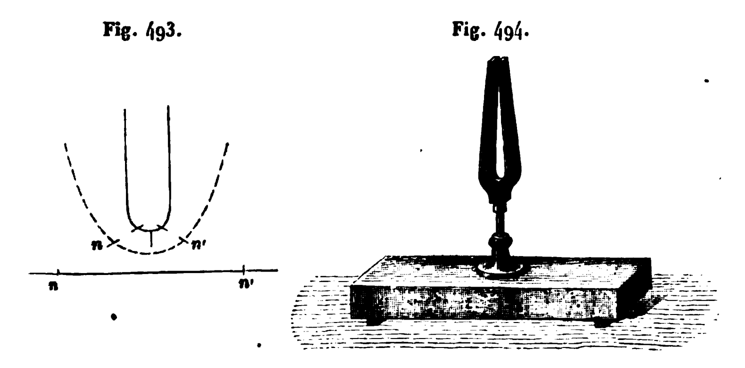
elles rendent les notes de la gamme.

Applications. — On fixe dans un cercle de bois qui renferme une caisse d'harmonie, une série de tiges de fer que l'on fait vibrer au moyen d'un archet, c'est le violon de fer. La caisse d'harmonie sert à renforcer le son.

Tout le monde connaît l'harmonica. C'est un instrument composé de plaques de verre de grandeurs décroissantes, suspendues sur deux fils à peu près parallèles. On frappe ces plaques avec des marteaux de bois, et elles rendent des sons qui dépendent de leur longueur.

Diapason. — Une verge que l'on courbe peu à peu éprouve un changement sensible. Les deux nœuds du son fondamental se rapprochent de plus en plus, sans cependant se confondre tout à fait, et le son s'élève (*fig.* 493). On peut alors soutenir l'appareil par une tige unique (*fig.* 494).

Fig. 493. Fig. 494.



Ces verges, en forme de fourchette, s'appellent *diapasons;* pour en renforcer le son, on les fixe sur des caisses de résonnance. On les ébranle avec un archet ou bien avec un marteau de bois.

CHAPITRE VI.

VIBRATIONS COMPOSÉES.

I. — SUPERPOSITION DE DEUX VIBRATIONS DE MÊME DURÉE.

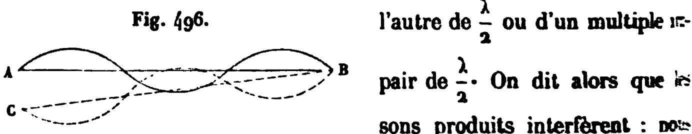
Principe des interférences. — Quand deux sons de même hauteur arrivent en un même point dans des directions parallèles, les vitesses de vibration se superposent. Il peut arriver deux cas remarquables :

1° Que les vitesses soient de même signe, alors elles s'ajoutent et le son définitif est augmenté. C'est ce qui arrivera si deux vibrations AB, CB (*fig.* 495), qui marchent dans le même sens, proviennent des points qui vibrent en concordance, et si la différence de leur distance est nulle ou égale à un multiple pair de $\frac{\lambda}{2}$.

Fig. 495.

2° Il peut se faire que les vitesses soient contraires, alors elles se retranchent et la superposition des deux sons produit du silence. Ce cas sera réalisé si deux vibrations AB, CD (*fig.* 496) sont en retard l'une sur l'autre de $\frac{\lambda}{2}$ ou d'un multiple impair de $\frac{\lambda}{2}$. On dit alors que les sons produits interfèrent : nous allons justifier ces prévisions par l'expérience.

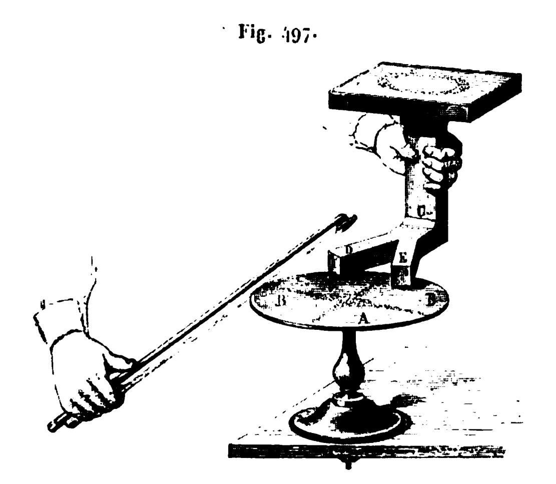
Fig. 496.



Interférences par réflexion. — On a vu que, dans les tuyaux ou dans les verges, les vitesses des rayons directs et réfléchis se superposent, qu'en certains points, les nœuds, elles sont toujours égales et contraires et déterminent des condensations et des dilatations alternatives; qu'en d'autres, les ventres, elles sont toujours parallèles et s'ajoutent. Aux nœuds, l'oreille n'entend rien, deux sons superposés ont produit du silence. Aux ventres, le son est plus intense que chacun de ceux qui y concourent.

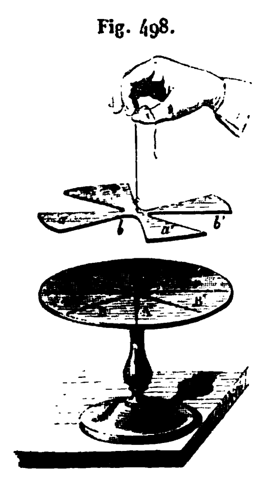
Interférences par les plaques. — On verra bientôt qu'une plaque ABA'B' (*fig.* 497) qu'on fait vibrer se partage en concamérations, séparées par des lignes nodales ou lignes de repos, et que, dans un même moment, les vibrations sont de sens contraire dans A et B, des deux côtés

Fig. 497.



d'un nœud, comme cela a lieu dans les cordes et les verges. Cela posé, plaçons au-dessus de la plaque un tuyau bifurqué DEC capable de rendre le même son qu'elle. Ce tuyau résonne lorsque ses deux branches sont placées au-dessus de deux concamérations A, A' qui ont, au même moment, la même phase de vibration; il ne rend aucun son lorsque ses extrémités D et E sont au-dessus de deux plages contiguës, A et B, dont les vibrations sont contraires.

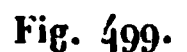
Fig. 498.

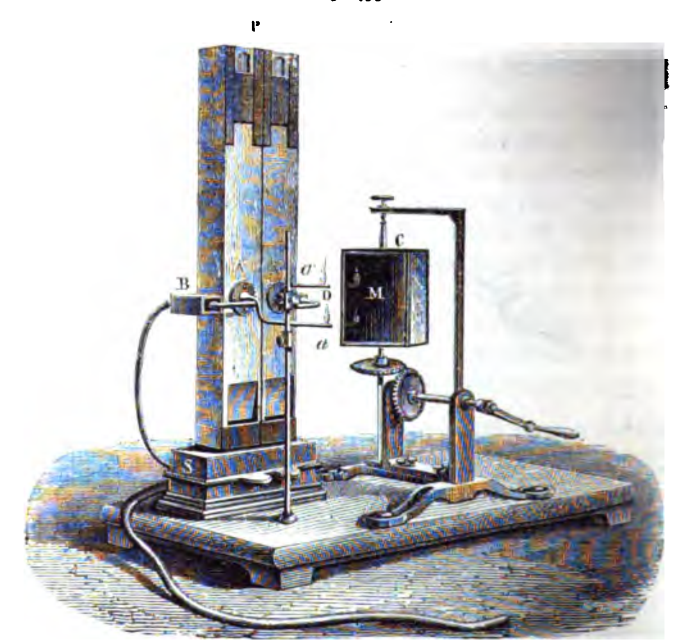


Quand on fait vibrer une plaque de manière qu'elle se divise en $2n$ concamérations (*fig.* 498), il est évident que l'oreille, placée au-dessus, reçoit, de chaque groupe de concamérations contiguës, des mouvements inverses qui se détruisent en partie. Mais on renforce notablement le son lorsqu'on superpose à la plaque un carton formé par n secteurs égaux a, a',.,., et par n ouvertures b, b',.... Celles-ci laissent passer les vibrations concordantes des plages B, B',..., et les

secteurs interceptent les mouvements contraires envoyés par A, A',.... En faisant tourner ce carton, on entend successivement des renforcements et des affaiblissements.

Interférences par les tuyaux. — Deux tuyaux identiques (*fig.* 499) sont embouchés sur la même soufflerie et donnent le même son. Au mi-


Fig. 499.



lieu de chaque tuyau est fixée une capsule manométrique, et on regarde dans un miroir tournant les images des deux flammes, disposées l'une au-dessus de l'autre; elles paraissent discontinues aussitôt que les tuyaux parlent, et l'on constate que les maxima de l'une correspondent aux minima de l'autre (*fig.* 500). Les deux tuyaux ont donc au même moment des vibrations opposées. Cela se conçoit : quand le courant d'air de la soufflerie, en rencontrant le biseau de l'une des embouchures, ne pénètre pas dans le tuyau à cause de la résistance que lui oppose l'air comprimé à l'intérieur, il entre dans le tuyau voisin; et quand il trouve de la résistance dans celui-ci, il pénètre dans le premier. Cela étant, on reconnait que, lorsque l'un

des tuyaux parle seul, le son est beaucoup plus fort que si les deux

Fig. 500.

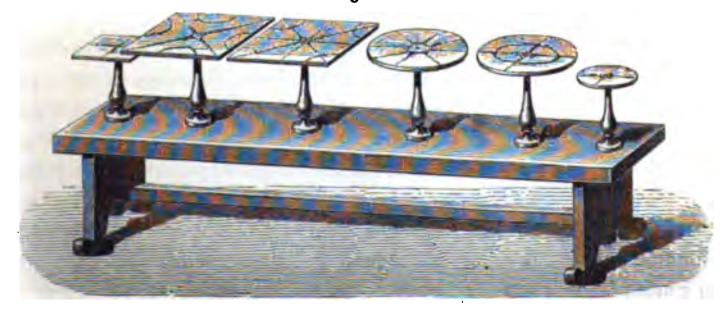


parlent à la fois; il y a donc interférence et, par conséquent, affaiblissement du son.

II. — LES PLAQUES VIBRANTES.

Lois expérimentales. — C'est par cette superposition de vibrations parallèles qui s'ajoutent ou se détruisent, qu'on explique le mode de vibration des plaques vibrantes. Pour déterminer ces vibrations, on fixe par des vis de pression, sur des supports convenables, des plaques de métal ou de verre de forme géométrique. On immobilise avec le doigt l'un des points où l'on veut produire des nœuds, tandis qu'on ébranle avec un

Fig. 501.



archet les parties du contour où doit se trouver un ventre. Les plaques se divisent alors en concamérations; on le reconnaît en projetant sur la

surface du sable fin qui s'amasse sur les lignes nodales dont il dessine les courbes (*fig.* 501). Ces lignes devant séparer des parties animées de vitesses contraires, le nombre des concamérations est toujours pair.

Les modes de division dont une plaque est susceptible et les sons qui leur correspondent peuvent varier à l'infini. La *fig.* 502 montre les plus simples des *figures acoustiques* que le sable dessine sur les plaques carrées. Avec les plaques circulaires, on obtient deux systèmes de nodales : des diamètres et des cercles concentriques. Pour produire les premiers, on fixe sur le bord de la plaque deux sommets consécutifs d'un polygone régulier de $2n$ côtés, et on frotte avec l'archet le milieu de l'arc qu'ils comprennent ; le sable dessine alors n diamètres également espacés. On produit les cercles en attaquant la plaque à l'aide d'une mèche de crins que l'on introduit dans un trou percé au centre, ou à l'aide d'une tige que l'on fait vibrer longitudinalement (*fig.* 503). Les deux systèmes de nodales peuvent d'ailleurs coexister.

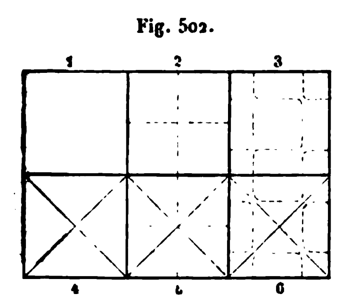
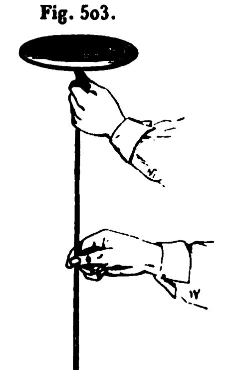


Fig. 502.


Fig. 503.

Pour des plaques de même matière, de forme semblable, donnant la même figure, les nombres de vibrations sont proportionnels à l'épaisseur e et en raison inverse des surfaces s :

$$N = K \frac{e}{s}.$$

Les timbres, cloches, tam-tams et cymbales étant des plaques courbes, leurs vibrations se font à peu près comme si elles étaient planes. Leur son le plus grave correspond à deux nodales rectangulaires qui divisent la surface en quatre parties égales. Enfin, les membranes flexibles que l'on tend sur les tambours et les timbales, les feuilles de papier collées sur des cadres, etc., vibrent à l'unisson des notes qu'on produit dans le voisinage, et se divisent en concamérations compliquées que l'on peut constater avec du sable.

Explication de ce phénomène. — M. Wheatstone a donné une explication ingénieuse de ces phénomènes. Supposons que les dimensions de

la plaque (*fig.* 504) soient telles, qu'une verge détachée dans la largeur donne, en vibrant avec deux nœuds *b*, *c*, le même son qu'une autre verge

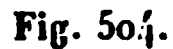
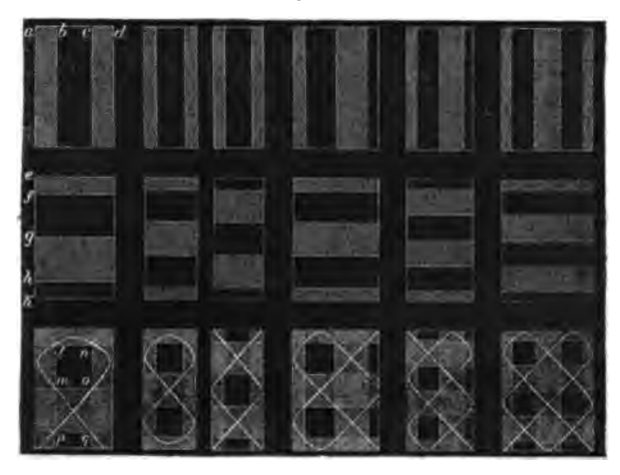


Fig. 504.



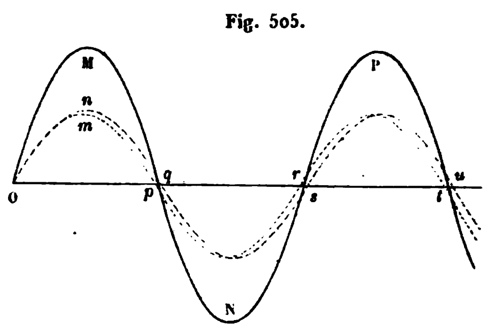
détachée dans la longueur et vibrant avec trois nœuds *f*, *g*, *h*. Comme le vibrations des verges sont indépendantes de leur largeur, on en conclut que la plaque peut vibrer à la fois avec les nodales *b*, *c* parallèles à la longueur et avec les nodales *f*, *g*, *h* parallèles à la largeur, et que les deux systèmes se superposent pour donner une nodale contournée *lnmopq*. Désignons par des hachures les plages qui ont au même moment des vitesses de même signe, laissant en noir celles qui ont des vitesses opposées. Lors de la superposition, ces vitesses s'ajouteront dans les cases où les hachures rencontreront des hachures, et les noirs des noirs; là seront les ventres. Elles se détruiront dans les cases où les hachures se rencontreront avec des noirs : c'est dans ces dernières cases que devront se trouver les lignes de repos. De plus, elles passeront par les six points de rencontre *l*, *n*, *m*, *o*, *p*, *q* des cinq nœuds élémentaires. Ces remarques nous permettent de tracer la forme générale de la nodale résultante, qui est indiquée par un trait blanc. L'expérience vérifie ce résultat.

III. — SUPERPOSITION DE DEUX VIBRATIONS DE DURÉE INÉGALE.

Battements. — Les phénomènes deviennent plus complexes quand on superpose des vibrations parallèles de durées inégales, c'est-à-dire des

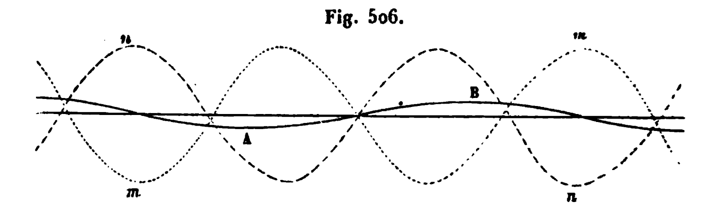
notes différentes. Supposons d'abord que les longueurs d'onde de ces notes soient presque égales, que les courbes qui représentent leurs vitesses soient (*fig.* 505) O*nqsu*... pour le son le plus grave, et O*mprt*... pour

Fig. 505.



le plus aigu, et qu'elles coïncident en O. La vibration résultante, qui est la somme des vitesses élémentaires, sera représentée par la courbe OMNP..., et le son sera renforcé. Mais la distance des nœuds *pq*, *rs*, *tu*,... augmente à chaque ondulation et finit par devenir égale à une demi-longueur d'onde. les deux courbes sont alors représentées par *nn*... et par *mm*... (*fig.* 506):

Fig. 506.



les vitesses sont devenues contraires; elles se retranchent et donnent la résultante AB..., dont les coordonnées sont presque nulles; le son se trouve donc notablement affaibli.

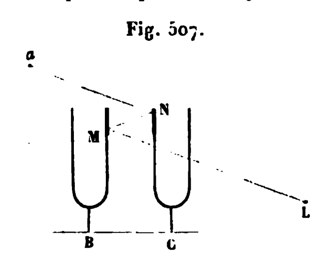
Le temps continuant de croître et le retard de l'une des vibrations sur l'autre d'augmenter, il devient égal à une ondulation, les mouvements se retrouvent d'accord. Cet accord se reproduira périodiquement $m - n$ fois par seconde, si m et n sont les nombres de vibrations des deux notes. Il en sera de même du désaccord : il y aura donc $m - n$ renforcements et $m - n$ affaiblissements du son, c'est-à-dire n battements.

Pour produire des battements, on fait le plus souvent usage de tuyaux identiques qu'on place sur une soufflerie. Il suffit de les désaccorder peu à peu, en mettant la main à l'extrémité de l'un d'eux, pour entendre des

coups de force et des affaiblissements alternatifs, d'abord très-lents, et qui s'accélèrent à mesure qu'on avance la main. On obtient les mêmes résultats avec deux diapasons en chargeant l'un d'eux d'un poids additionnel.

On peut montrer à l'œil les agrandissements et les diminutions des vibrations qui produisent les battements. Soient MB et NC deux diapasons identiques et parallèles, portant deux miroirs M, N (*fig.* 507), en regard l'un de l'autre. Un filet lumineux LM se réfléchit en M, puis en N, et vient rencontrer un écran vertical en *a*. Si l'un des deux diapasons est mis en vibration, le point lumineux *a* se déplace verticalement; et, à cause de la persistance des impressions, *a* se transforme en une ligne verticale brillante. Quand les deux vibrent à la fois, il peut arriver ou que les deux mouvements s'accordent pour augmenter la longueur de cette ligne, ou qu'ils se contrarient de manière à la diminuer. Si les diapasons ne sont pas tout à fait à l'unisson, ils se montrent tantôt en concordance, tantôt en discordance, et l'on voit la ligne brillante s'allonger et se raccourcir alternativement. D'un autre côté l'oreille constate qu'il y a des battements, et qu'ils coïncident avec les altérations de l'image.

Fig. 507.

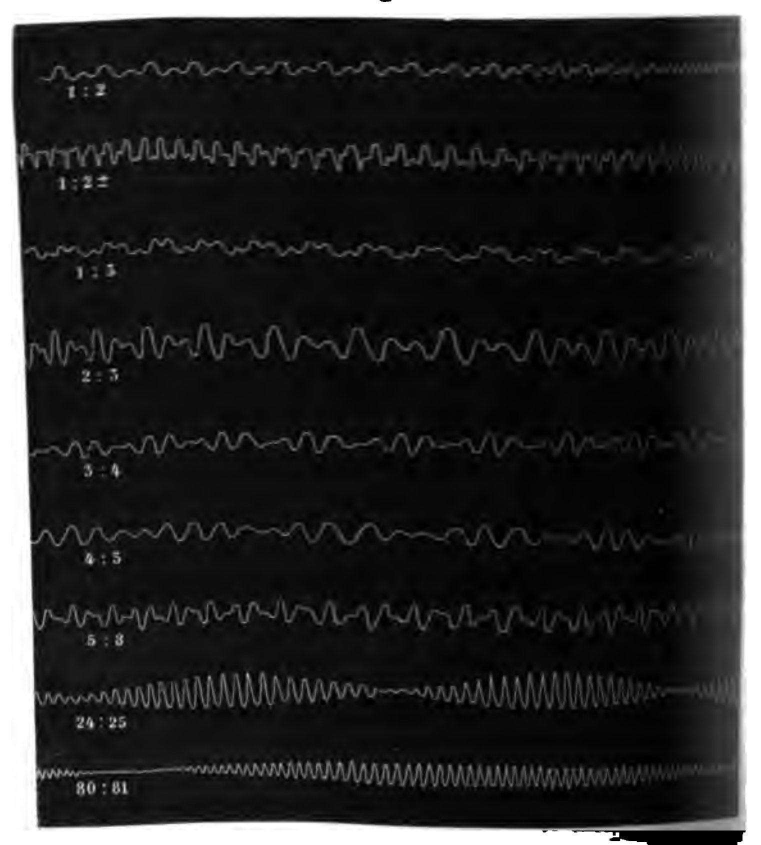


La méthode graphique conduit au même résultat à l'aide de deux diapasons parallèles et d'un appareil analogue à celui de la *fig.* 450. Sur l'un d'eux, qui est fixe, est collée une lame de verre noirci qui partage ses vibrations; l'autre est sur un chariot entraîné par un poids P et porte une pointe qui trace ses vibrations sur la lame de verre; de cette façon, les déplacements de la pointe s'ajoutent à ceux de la lame de verre, c'est-à-dire du premier diapason. Le tracé est très-ample aux endroits où se sont rencontrées les vitesses de même sens, et très-étroit où elles ont été contraires. Les deux dernières lignes de la *fig.* 508 montrent ce qu'on obtient quand ces alternatives se reproduisent de 25 en 25, ou de 81 en 81 vibrations, c'est-à-dire quand les nombres *n* et *m* sont entre eux comme 24 à 25 ou comme 80 à 81, et que les intervalles des deux notes sont d'un demi-ton ou d'un comma.

Superposition des accords. — On peut dessiner par le même procédé le résultat de la superposition de deux notes qui forment un accord quelconque $\frac{n}{m}$. Il est clair que les périodes de concordance et de discordance se reproduisent toutes les fois que les deux notes ont fait l'une *n*, l'autre

m vibrations, et que l'on obtient un tracé complexe. On trouve dans le tableau précédent les figures qui correspondent aux intervalles $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{2}{3}$,

Fig. 508.



$\frac{3}{4}$, $\frac{4}{5}$, $\frac{5}{8}$. Ces figures changent avec la phase et avec l'inten
des deux notes.

On peut encore employer à la même étude l'appareil (*fig.*
des tuyaux est à l'octave de l'autre, la flamme qui lui corresp
deux fois plus de vibrations que la deuxième (*fig.* 509); et si on fait communiquer les deux capsules avec un seul bec de gaz, la flamme unique éprouve la somme des effets des deux tuyaux. De deux en deux

est allongée ou raccourcie (*fig.* 510). Si le rapport des deux notes est $\frac{4}{5}$, on aura la *fig.* 511, où la périodicité se reproduit de 5 en 5.

Fig. 509.



Fig. 510.



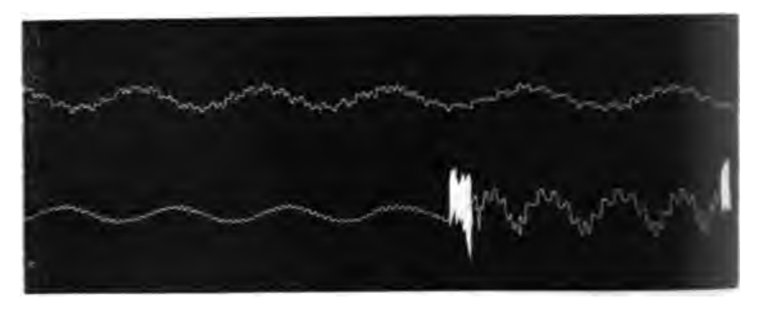
Fig. 511.



Au lieu de deux notes, on en peut superposer un nombre quelconque : c'est ce qui arrive quand les instruments d'un orchestre parlent à la fois,

ou même avec un seul instrument tel que le violon, qui émet à la fois un grand nombre d'harmoniques. Dans tous les cas, ces vibrations multiples sont reproduites par le *phonautographe* (*fig.* 451), instrument qui a été décrit page 459. Il recueille tous les sons, les concentre à son foyer,

Fig. 512.

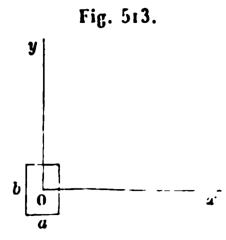


transmet toutes les vibrations à la membrane focale, et le style les écrit sur le tambour. La courbe (*fig.* 512) a été obtenue de cette manière.

IV. — SUPERPOSITION DES VIBRATIONS RECTANGULAIRES.

Soit en O (*fig.* 513) la section rectangulaire d'une verge prismatique. Elle peut vibrer dans le plan Ox ou dans le plan Oy; dans ces deux cas les nombres de vibrations seront respectivement proportionnels aux épaisseurs a et b. Mais elle peut aussi vibrer dans les deux sens à la fois et, les deux mouvements se superposant, le point O décrira une courbe.

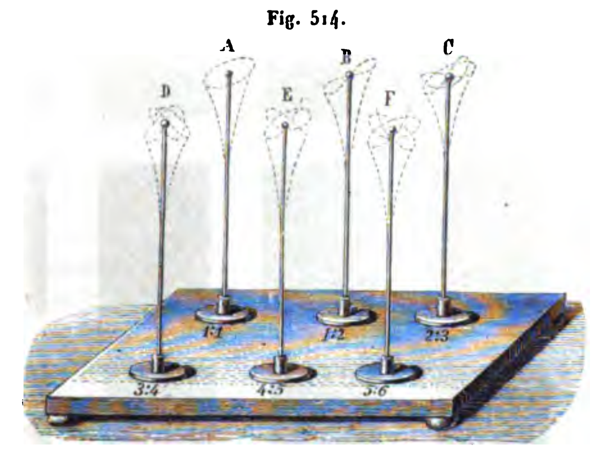
Fig. 513.



Supposons que la verge soit carrée, et que les deux vibrations rectangulaires aient la même durée. Lorsqu'elles partiront à la fois du point O suivant Ox et Oy, elles se composeront en une vibration rectiligne. Si Oy est en retard de $\frac{1}{8}$ d'ondulation, la trajectoire sera une ellipse inclinée; elle sera droite, inclinée inversement, et rectiligne quand le retard deviendra égal à $\frac{1}{4}$, $\frac{3}{8}$, $\frac{1}{2}$. S'il continue d'augmenter, on repassera par les mêmes apparences de la dernière à la première. La trajectoire a la forme d'un 8 si la dimension b est double de a, et elle devient plus compliquée

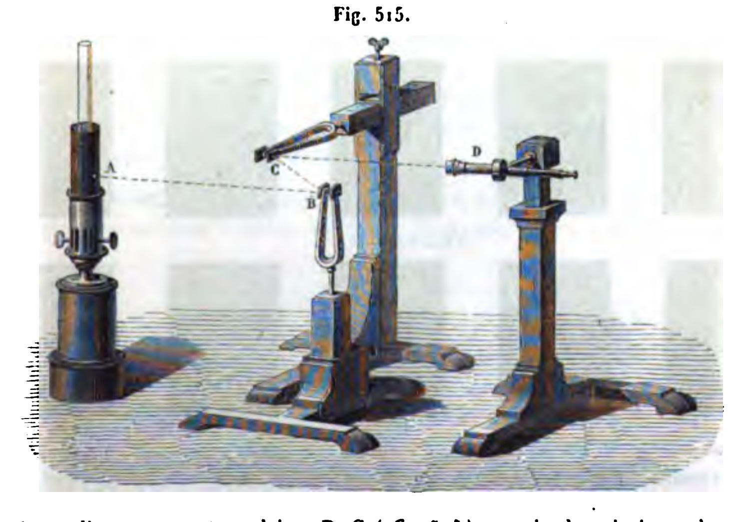
quand le rapport $a:b$ est égal à $\frac{2}{3}, \frac{3}{4}, \frac{4}{5}, \ldots$ Pour justifier ces prévisions théoriques, M. Wheatstone fixe au bout des tiges des perles brillantes dont le mouvement rapide dessine les courbes en traits lumineux. Il donne à cet appareil le nom de *caléidophone* (*fig.* 514).

Fig. 514.



M. Lissajous a reproduit plus élégamment ces courbes au moyen de

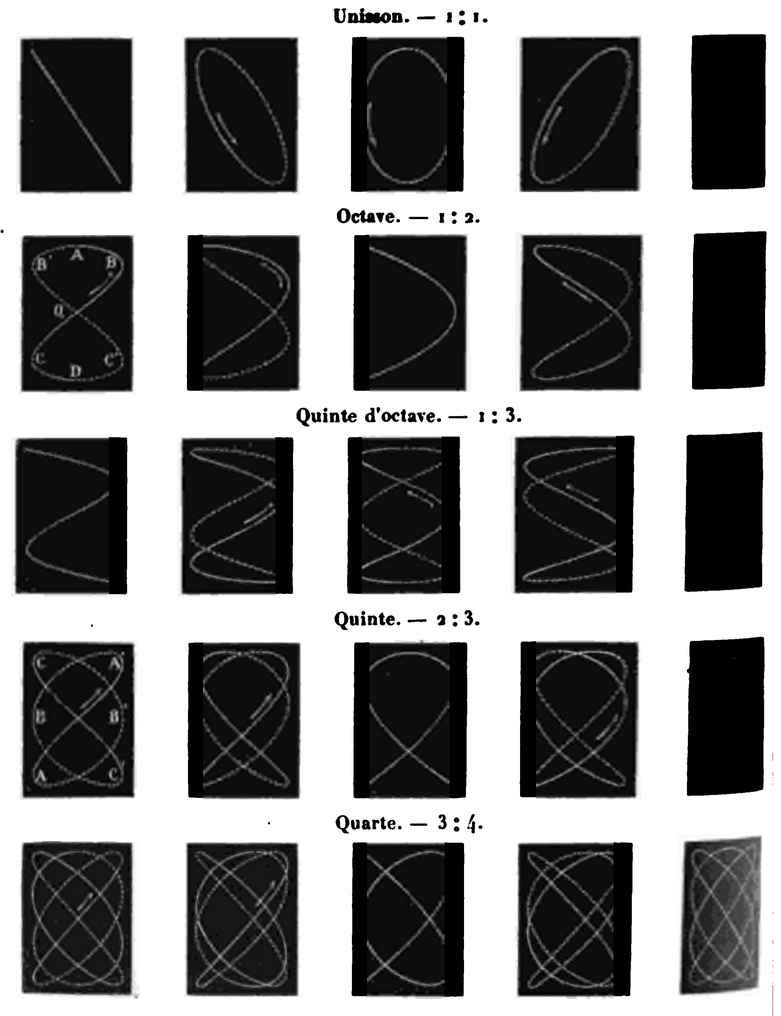
Fig. 515.



deux diapasons rectangulaires B, C (*fig.* 515), munis de miroirs qu'on

éclaire par un point lumineux A et qu'on regarde soit à l'œil [illegible]

Fig. 516.



une lunette D. On peut aussi, à l'aide d'une lentille, projeter l'image de ces courbes sur un tableau noir. On obtient les courbes ci-dessus (*fig.* 516

CHAPITRE VII.

LA VOIX ET L'OUIE.

I. — LE TIMBRE.

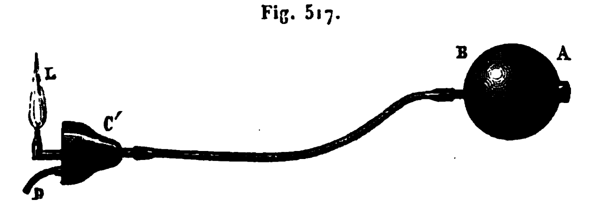
Résonnance.— Nous avons vu que le phonautographe dessine la courbe d'un son complexe. Il faut chercher maintenant à décomposer ce son en ses éléments simples. On y parvient par la résonnance.

Plaçons aux deux extrémités d'un appartement deux diapasons identiques montés sur leurs caisses, et faisons vibrer l'un d'eux. Aussitôt l'autre s'ébranlera et continuera de résonner, même après qu'on aura éteint le mouvement du premier.

En général, tout corps capable de produire une note donnée vibre aussitôt que cette note est produite à une certaine distance par un instrument quelconque. Ce fait constitue la *résonnance*. Il s'explique aisément. Le diapason qu'on fait vibrer ébranle l'air de la chambre, et cet air le second diapason. Une première impulsion suffit pour lui imprimer déjà un mouvement vibratoire qui se continuerait indéfiniment, mais qui serait très-faible. La seconde ajoute un effet concordant, et ainsi de suite. Si, au contraire, les diapasons ne sont pas d'accord, il y a d'abord une période où les effets s'ajoutent, puis il en vient une autre où ils se détruisent, comme nous l'avons expliqué pour les battements, et les effets n'acquièrent jamais intensité capable d'affecter l'oreille.

Résonnateurs. — M. Helmholtz a tiré parti du phénomène de la résonnance pour analyser les sons. A cet effet, il emploie sous le nom de *réson-*

Fig. 517.

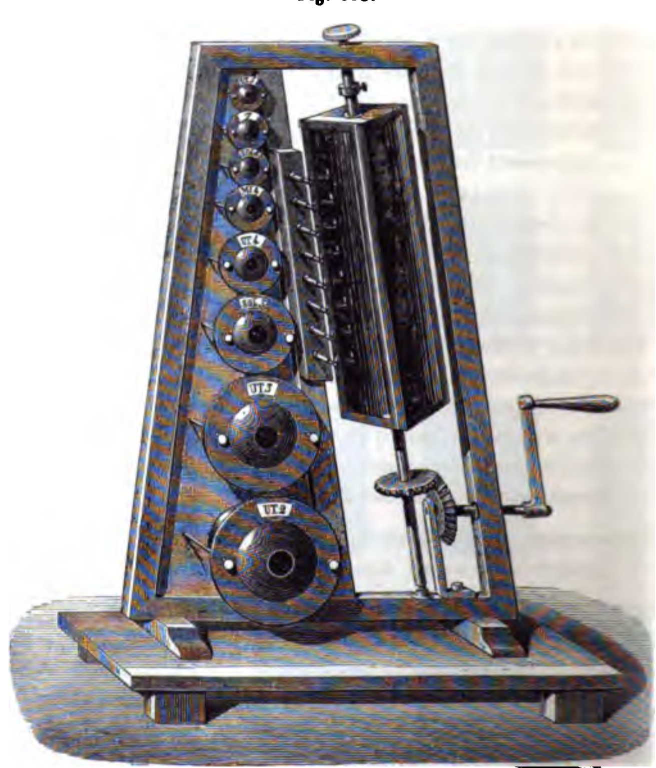


nateurs des sphères creuses (*fig.* 517) avec deux ouvertures, l'une A, qui

recueille les sons extérieurs, l'autre B qui est surmontée d'un appendice destiné à être introduit dans l'oreille, ou à être mis en communication avec une capsule manométrique DC'. La flamme L s'agitera ou restera en repos, suivant que le résonnateur parlera ou non. On peut le faire parler en soufflant sur le bord de l'orifice antérieur A, et l'on reconnaît ainsi le son qui lui est propre et sous l'influence duquel il peut vibrer : ce son est d'autant plus aigu que la sphère est plus petite.

Quand on émet dans le voisinage de cet appareil une note à l'unisson de la sienne, il résonne et la renforce ; mais il reste muet si elle est plus aiguë ou plus grave. Si donc on produit un mélange complexe de plusieurs

Fig. 518.

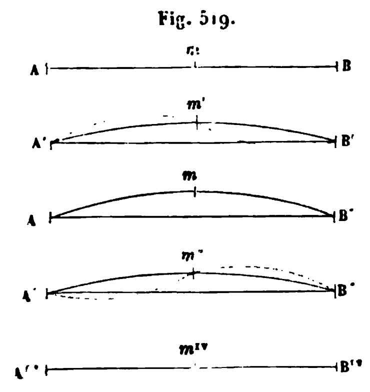


sons, le résonnateur y fait reconnaître la note avec laquelle il est accordé, pourvu qu'elle y existe. Une série de résonnateurs échelonnés par inter-

valles rapprochés pourra servir à analyser les sons complexes. La *fig.* 518 représente cette série avec des capsules manométriques et un miroir tournant pour observer l'image des flammes.

Par ces moyens, M. Helmholtz a constaté que le *timbre* des différents instruments est constitué par le mélange et la force relative des harmoniques qui accompagnent le son fondamental de ces instruments. Les notes de la flûte sont à peu près simples, c'est-à-dire dépourvues d'harmoniques; elles ont un timbre extrêmement doux. Les sons des cordes en ont au contraire un grand nombre, et leur timbre est plus riche. Ces harmoniques s'expliquent aisément. Supposons que la corde vibre en totalité (*fig.* 519); elle prendra successivement, après des temps égaux à un quart de vibration, les formes A*m*B, A'*m*'B'. Pour donner l'harmonique 2, elle effectuera une demi-vibration pendant chaque quart de l'oscillation totale et prendra les contours ponctués représentés dans la figure.

Fig. 519.



De même, la corde pourra encore se subdiviser en trois parties vibrantes, et faire entendre faiblement la quinte de l'octave et ainsi de suite. Il résultera de ces divisions un mouvement complexe produisant la superposition des notes harmoniques 1, 2, 3, 4,..., notes qu'on pourra distinguer en approchant des résonnateurs convenables.

II. — LA VOIX HUMAINE.

Cette analyse des sons nous conduit à l'explication de la voix. La voix prend naissance dans le larynx par l'effet du passage de l'air à travers une fente formée par deux membranes opposées que des muscles tendent ou relâchent à volonté. Le son qui est ainsi produit est grave ou aigu, très-complexe et très-riche en harmoniques. Les cavités buccales le modifient ensuite en faisant l'office de résonnateurs; et comme leur note change suivant leur étendue, suivant l'ouverture de la bouche et la forme qu'on lui donne, certains harmoniques sont ou ne sont pas renforcés, et la voix prend des timbres différents. C'est ce qui constitue les voyelles.

Après de nombreuses expériences, M. Helmholtz a prouvé que, p… former une voyelle déterminée, il faut ajouter au son fondamental une … plusieurs notes caractéristiques, toujours les mêmes, et que nous nomm… rons *vocables*. Elles changent avec la syllabe prononcée, mais elles … dépendent ni de la hauteur du son, ni de la personne qui l'émet. Voici … vocables pour les diverses voyelles.

Voyelles....	Ou	O	A	Ai	E	I	Eu	U
Vocables...	fa_2	$(si\flat)_3$	$(si\flat)_4$	$ré_4$ sol_5	fa_3 $(si\flat)_5$	fa_2 $ré_6$	fa_3 $(ut\sharp)_5$	fa_2 [illegible]

On justifie cette analyse par deux épreuves démonstratives :

1° On prend des diapasons qui émettent les sons fa_2, $(si\flat)_3$, $(si\flat$… on les fait vibrer devant des résonnateurs qui les renforcent ; on tr… qu'ils rendent les sons Ou, O, A ;

2° On place les mêmes diapasons devant la bouche, en donnant à ce… les formes qui conviennent pour prononcer Ou, O, A, mais sans émet… aucun son ; on reconnait que les diapasons sont renforcés, et l'on dist… les voyelles Ou, O, A ;

3° Enfin M. Helmholtz a fait aussi la synthèse des voyelles en superp… sant des notes simples données par une série harmonique de diapa… L'une des expériences les plus curieuses qu'on puisse faire à ce sujet … de crier une voyelle dans la caisse d'un piano, après avoir soulevé l… étouffoirs ; aussitôt les cordes qui correspondent aux harmoniques d… voix vibrent par résonnance, et leurs vibrations reconstituent la mê… voyelle comme une sorte d'écho de la voix.

III. — L'OREILLE.

L'oreille se compose : 1° d'un pavillon, qui se prolonge par un tu… appelé le *conduit auditif*, et fermé par une membrane, le *tympan :* c… l'oreille externe ; 2° d'une cavité moyenne de forme compliquée (la *cai*… contenant une chaîne de petits osselets (le marteau, l'enclume, l'os len… culaire et l'étrier) destinés à transmettre les mouvements du tympan ve… l'oreille interne ; 3° de l'oreille interne ou *labyrinthe*, cavité en forme de limaçon, qui communique avec la caisse par la *fenêtre ovale*, sur laqu… vient s'appliquer l'étrier. Le labyrinthe renferme un liquide où vient s'ép… nouir le nerf acoustique sous forme de fibrilles appelées les *fibres de Cort*… chacune de ces fibres, dont le nombre dépasse trois mille, semble accor-

dée et répondre à une note particulière, de manière à vibrer par résonnance sous l'action des sons extérieurs.

Pour expliquer les causes des consonnances et des dissonances, il faut d'abord remarquer qu'une corde résonne sous l'influence, non-seulement des notes qui lui sont propres, mais aussi de notes très-voisines. Il s'ensuit qu'étant sollicitée par deux sons rapprochés du sien, elle éprouvera des battements, c'est-à-dire que ses vibrations passeront par des alternatives de faiblesse et de force. On suppose qu'il en est de même des fibres de Corti, que, sous l'action de deux notes très-rapprochées, elles sont agitées par des battements, et que ces intermittences blessent l'oreille et produisent l'effet désagréable des dissonances.

Outre cela, deux notes ne sont jamais simples, elles sont toujours accompagnées d'harmoniques. Pour qu'elles soient consonnantes, il faut qu'ils coïncident. Ainsi, par exemple, les harmoniques d'une note quelconque étant 1, 2, 3, 4, 5, 6,... et ceux de l'octave 2, 4, 6, 8, il y a coïncidence; l'octave est donc une consonnance. Mais aussitôt que l'une des deux notes fondamentales est légèrement altérée, les harmoniques le sont aussi, l'octave devient fausse et se change en dissonance très-désagréable, parce que les harmoniques successifs du son le plus aigu battent avec les notes 2, 4, 6,... du son le plus grave.

LIVRE VII.

DE L'OPTIQUE.

CHAPITRE PREMIER.

MOUVEMENT LUMINEUX. — SA VITESSE.

I. — PROPAGATION RECTILIGNE.

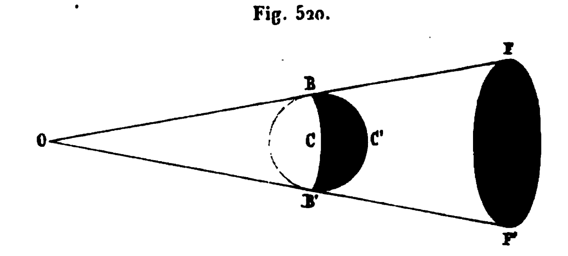
L'existence des objets éloignés nous étant révélée par les yeux, même à travers le vide, il faut qu'un agent spécial soit interposé dans l'espace entre l'œil et les objets. On le nomme *lumière*, *fluide lumineux* ou *éther*. Il est perpétuellement en mouvement, puisqu'il nous montre après un intervalle extrêmement court tous les changements qui surviennent dans les objets extérieurs. Nous pouvons nous représenter ce mouvement de deux manières : ou bien la lumière est composée d'une infinité de molécules qui sont lancées dans toutes les directions par les sources éclairantes et qui, finalement, arrivent dans l'œil : c'est l'ancienne *théorie de l'émission;* ou bien l'agent lumineux est un corps élastique, remplissant l'espace, pénétrant la matière pondérable, et dont les molécules reçoivent et transmettent des vibrations engendrées par les corps éclairants, comme les milieux pondérables transmettent les vibrations sonores : c'est la *théorie des ondulations*, c'est la seule qui puisse expliquer tous les phénomènes, la seule que nous admettrons.

Ondes. — Rayons. — Le mouvement parti, à un moment donné, d'un point lumineux arrive après un temps déterminé sur une surface que l'on nomme *surface de l'onde*. Dans les cristaux, ces surfaces peuvent devenir très-complexes; dans les milieux homogènes et non cristallisés, elles sont sphériques par raison de symétrie, et la *vitesse de propagation* se mesure par l'accroissement du rayon pendant l'unité de temps. Ces sphères grandissent comme un ballon qui se gonfle, et, à une distance infinie du point de départ, elles sont planes.

L'expérience prouve que dans l'air on voit chaque point lumineux dans la direction de la droite qui joint l'œil à ce point, d'où l'on déduit que : *dans les milieux homogènes la lumière se propage en ligne droite ;* et l'on nomme *rayon* la direction qu'elle suit. De cette propagation rectiligne résultent quelques conséquences que nous allons développer :

Ombre. — Un point lumineux O, placé devant un corps opaque, envoie un cône de rayons tangents BOB′ (*fig.* 520). Les points du corps situés

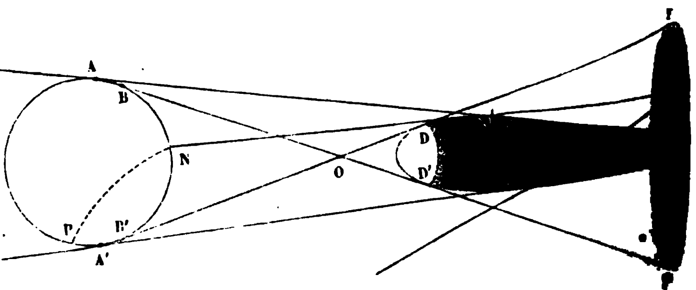
Fig. 520.



en avant de la ligne de contact BCB′ sont éclairés ; ceux qui sont placés derrière sont dans l'obscurité. Tous les corps qui pénétreront dans le tronc de cône BB′FF′ *s'éclipseront,* et sur un écran vertical on verra se dessiner une *ombre portée* FF′.

Pénombre. — Si nous considérons maintenant deux corps, l'un lumineux AA′, l'autre opaque DD′ (*fig.* 521), tous deux de révolution autour

Fig. 521.



d'un même axe, et que nous menions les cônes tangents intérieurement et extérieurement, aucun rayon ne pénétrera dans celui-ci, qui découpera sur l'écran une ombre absolue. Mais l'espace compris entre les deux surfaces sera partiellement éclairé, et marquera une pénombre. Le point X par exemple, ne verra pas la partie NB′A′P du corps éclairant, mais seule-

ment la portion supérieure NBAP, et comme celle-ci, d'abord nulle, augmentera quand le point M ira de la limite de l'ombre à la limite FF', la pénombre s'illuminera peu à peu jusqu'à se fondre insensiblement dans la lumière complète en FF'. Le point M' sera dans les mêmes conditions que M, et il y aura sur le corps une pénombre s'éclairant de plus en plus depuis CC' jusqu'à DD'.

Chambre obscure. — Quand les rayons partis d'un objet ABC (*fig.* 522) pénètrent dans une chambre obscure par un trou O très-étroit, ils peignent

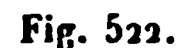
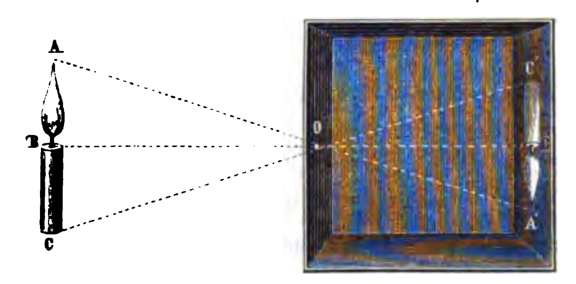


Fig. 522.



sur la paroi opposée l'image renversée de cet objet. En effet, parmi les faisceaux élémentaires envoyés par le point A, un seul traverse l'ouver-

Fig. 523.

ture O, et, continuant sa route, va illuminer A'; de même B et C éclairent B' et C'. La couleur des diverses parties de l'objet, le rapport de leurs

clairements, toutes leurs conditions de forme se reproduisent sur l'écran, où se peint une image renversée semblable à l'objet. Par conséquent, le Soleil sera dessiné par un cercle, et, pendant une éclipse, on verra l'ombre envahir progressivement l'image, comme elle envahit l'astre lui-même, mais par le bord opposé.

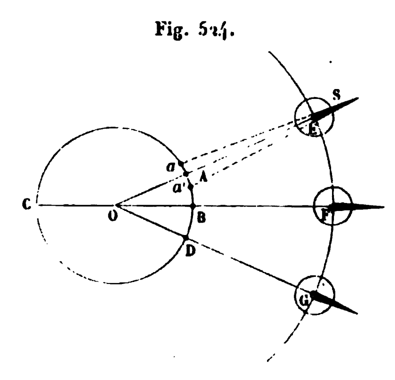
Supposons que l'ouverture O s'agrandisse et devienne, par exemple, une fente linéaire AB (*fig.* 523). Les points extrêmes A, B donneront deux images rondes du Soleil, d'abord petites et séparées (a, b), qui empiéteront ensuite l'une sur l'autre à mesure que le fond se reculera (a', b' et a'', b''), jusqu'à ne former qu'une seule image ronde, un peu confuse sur les bords.

II. — VITESSE DE LA LUMIÈRE.

Aucun mouvement ne se propageant instantanément, la lumière doit mettre un temps déterminé pour arriver des corps lumineux à l'œil. Quatre procédés ont été employés pour mesurer ce temps.

Rœmer, 1775-1776. — Le premier est dû à Rœmer. En observant le premier satellite de Jupiter qui décrit un cercle autour de la planète E, on le voit se plonger périodiquement dans l'ombre portée pour en sortir ensuite. Le Soleil se trouvant en O, Jupiter en E et la Terre en a, un peu avant la conjonction (*fig.* 524), on observait les immersions, qui seules alors étaient visibles; puis, quand la Terre avait dépassé le point de conjonction A et qu'elle se trouvait en a, on ne voyait plus que les émersions. Pendant ces observations la distance de la Terre au satellite n'avait pas sensiblement changé, on trouva que l'intervalle entre deux extinctions ou deux réapparitions successives était de quarante-deux heures trente minutes.

Fig. 524.

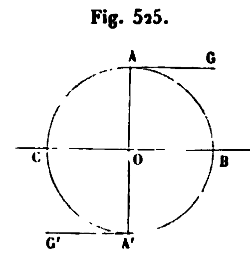


Après la conjonction, les deux planètes furent emportées dans leurs orbites, et Jupiter (qui fait sa révolution en onze ans et dix mois) était en F quand la Terre se trouvait en opposition au point C. Leur distance avait alors augmenté du diamètre de l'orbite terrestre, ou de 30 000 000 de myriamètres. Pendant ce temps, Rœmer

avait constaté un retard croissant des émerions, retard qui s'éleva finalement à seize minutes vingt-six secondes ; il l'expliqua par le temps que la lumière emploie à franchir l'augmentation de la distance, c'est-à-dire l'orbite CD. A partir de l'opposition, les deux astres se rapprochèrent ; on ne voyait que les immersions, et elles avançaient au lieu de retarder. Au moment de la conjonction, l'avance totale était devenue égale au retard constaté précédemment, c'est-à-dire à seize minutes vingt-six secondes. En divisant par ce nombre le diamètre de l'orbite terrestre, Rœmer trouva la vitesse de la lumière, qui est approximativement égale à 308000 kilomètres par seconde.

Bradley, 1728. — Soixante années plus tard, Bradley découvrait un autre phénomène, qui permit une seconde mesure de la vitesse de la lumière. Quand la Terre est au point A de son orbite et qu'elle se transporte suivant la tangente AG (*fig.* 525), on voit à leur place réelle les deux étoiles qui sont dans la direction de cette tangente ; mais toutes celles qui sont à ce moment dans le plan perpendiculaire AA′ sont déplacées dans le sens AG d'un angle égal à 20",445. Six mois après, la Terre est en A′, et les mêmes étoiles ont éprouvé un déplacement égal, mais de direction opposée ; et comme le plan AA′ tourne de 360 degrés en une année, le même effet se produit successivement sur toutes les étoiles du ciel. Celles qui sont dans l'écliptique, se trouvant deux fois par an dans la direction d'une tangente à l'orbite, oscillent dans son plan de 20",445 autour de leur position moyenne et décrivent une droite. Il y en a deux qui sont placées aux pôles de l'écliptique ; elles sont toujours déviées de 20",445 dans la direction de la tangente, et elles décrivent des cercles. Enfin, toutes celles qui ne sont ni aux pôles de l'écliptique, ni dans son plan, paraissent se transporter sur des ellipses plus ou moins allongées. Ces circonstances constituent l'*aberration*. Bradley les expliqua par le concours du mouvement de translation de la Terre avec le mouvement de progression de la lumière.

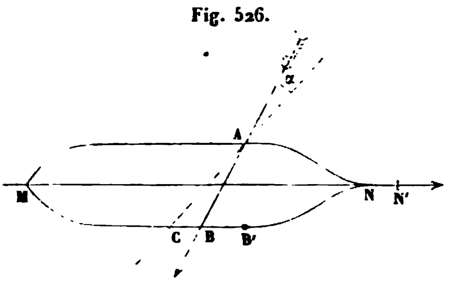
Fig. 525.



Pour comprendre cette explication, figurons-nous un navire qui marche suivant la ligne MN (*fig.* 526), et un boulet qui arrive suivant AB. Si le navire était immobile, le boulet traverserait les bordages en deux points opposés A, B, qui seraient dans la véritable direction du tir ; mais il n'en sera plus ainsi pour un navire en marche. Pendant que le boulet franchit l'espace AB, le navire fait le chemin NN′, et le point B est transporté

en B'; le boulet rencontre donc un autre point C, qui a eu le temps d'arriver où était d'abord B. La comparaison des deux brèches A, C donnera la direction apparente du tir, qui sera représentée par la ligne AC. L'angle de déviation BAC = α se nomme l'*aberration*. On a dans le triangle ABC

Fig. 526.



$$\frac{\sin\alpha}{\sin ABC} = \frac{BC}{AB}.$$

D'autre part, les espaces AB, CB parcourus simultanément par le boulet et par un point C du navire sont entre eux comme les vitesses v et V du boulet et du navire; par conséquent

$$\sin\alpha = \frac{v}{V}\sin ABC.$$

Supposons maintenant que le navire représente la Terre, AB un rayon de lumière, et AC une lunette; la lumière rencontre l'objectif en A, elle n'arrive à l'oculaire B qu'au moment où il se trouve déjà en C, emporté par le mouvement de la Terre. Il en résulte que, pour viser l'étoile placée dans la direction BA, la lunette doit être dirigée suivant CA et faire avec la véritable direction de l'étoile un angle égal à l'aberration α.

La formule montre que l'aberration est nulle quand la direction AB est parallèle à la direction CB du mouvement de la Terre, et qu'elle est maximum lorsque ABC est droit, c'est-à-dire quand AB est perpendiculaire à CB, ce qui s'accorde avec les faits observés. Or le maximum de α est égal à 20",445, et la vitesse de translation v de la Terre est égale à 7,6 lieues; on a donc

$$\frac{7,6}{V} = \sin 20'',445,$$

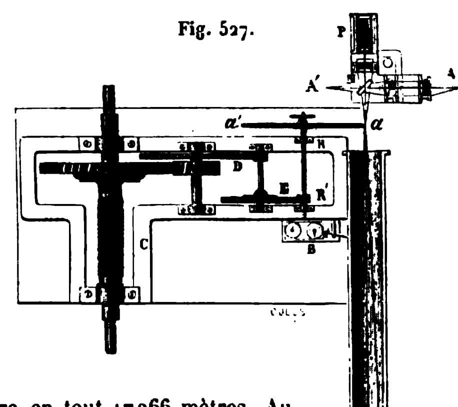
et l'on peut calculer la vitesse V de la lumière. On retrouve ainsi, à très peu près, le nombre obtenu par Rœmer.

M. Fizeau, 1849. — Après ces mesures astronomiques, les physiciens ont essayé de mesurer la vitesse de la lumière à la surface de la Terre.

M. Fizeau avait installé à Suresnes un appareil composé d'une lunette horizontale OP (*fig.* 527), dont l'oculaire P était séparé du tube. Dans l'espace intermédiaire était disposée une lampe A et un système de lentilles qui formait un foyer en A'. Une glace sans tain N transformait cette

image A′ en un foyer réel a, d'où la lumière partait pour traverser l'objectif O et, devenue parallèle, continuer sa route jusqu'à Montmartre. Là, elle traversait un deuxième objectif O′, se concentrait en H′, et y rencontrait un miroir vertical qui la renvoyait en O′, puis en O, puis en a, et enfin dans l'œil, à travers l'oculaire P, après avoir ainsi parcouru deux fois la distance de Suresnes à Montmartre, c'est-à-dire en tout 17266 mètres. Au point a, M. Fizeau avait installé le contour d'une roue dentée verticale aa', portée par un axe RR′, qu'un mouvement d'horlogerie faisait tourner avec une vitesse facile à régler. Les dents de cette roue interceptaient périodiquement la lumière au point a. Elle avait 720 dents; lorsqu'elle faisait $12\frac{1}{2}$ tours par seconde, il passait 9000 dents et un nombre égal de vides au point a dans l'espace d'une seconde; la lumière était alors interceptée pendant $\frac{1}{18000}$ de seconde, puis elle passait librement pendant un temps égal. Or, pendant ce temps, elle franchissait $\frac{308000}{18000} = 17$ kilomètres, c'est-à-dire qu'elle avait le temps d'aller de Suresnes à Montmartre et de revenir; mais au retour, elle trouvait le passage a fermé, puisque ce passage ne restait ouvert que pendant $\frac{1}{18000}$ de seconde, et le point lumineux devenait invisible. En déterminant d'une manière précise la vitesse de la roue dentée qui correspondait à une éclipse complète, M. Fizeau trouva pour la vitesse de la lumière 315364 kilomètres.

Fig. 527.

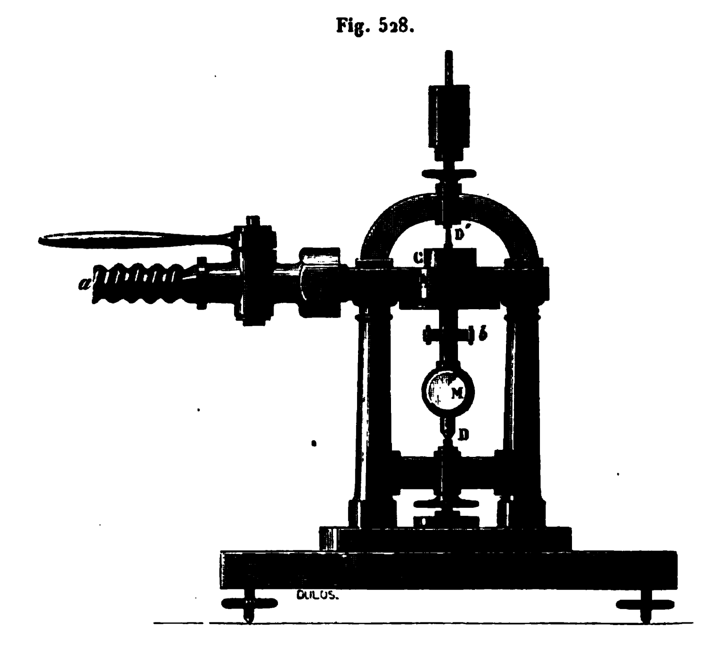


Arago, 1838. — Avant que M. Fizeau exécutât ce travail, M. Wheatstone avait mesuré la vitesse de l'électricité à l'aide du *miroir tournant*.

Il regardait, dans un miroir tournant autour d'un axe horizontal, trois étincelles qu'une décharge électrique produisait dans un fil interrompu en trois points horizontaux A, B, C. Les deux étincelles A, C éclataient simultanément et paraissaient sur une même ligne horizontale; mais en B, le courant n'arrivait qu'après avoir traversé un long circuit : aussi l'étincelle B paraissait-elle déviée, le miroir ayant un peu tourné dans l'intervalle. Dès 1838, Arago eut l'idée d'appliquer cette méthode à la mesure de la vitesse de la lumière; il publia un projet d'expériences très-circonstancié, et fit construire par M. Breguet un appareil destiné à les réaliser : mais avant qu'il eût pu s'en servir, Foucault exécuta l'expérience d'Arago avec un instrument simplifié.

Foucault, 1850. — Le miroir tournant de Foucault était porté par une petite turbine, mise en mouvement par une soufflerie, à peu près comme la sirène de Cagniard-Latour (*fig.* 528); le miroir M fixé sur l'axe DD'

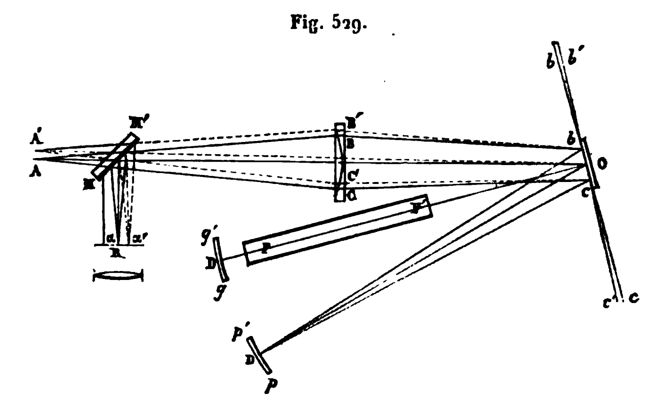
Fig. 528.



pouvait faire jusqu'à 800 tours par seconde. Ce miroir, représenté en O (*fig.* 529), se trouvait dans une chambre obscure, en face d'une ouverture A, qui envoyait un faisceau de lumière et qui portait à son milieu

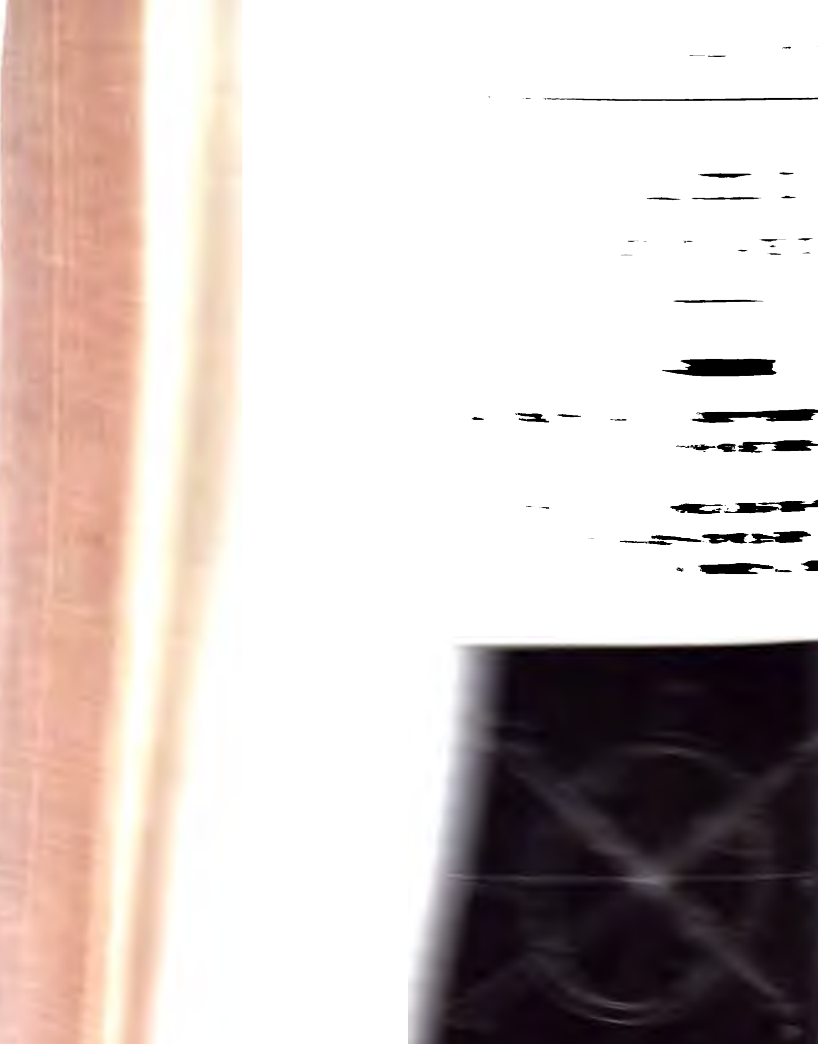
un fil vertical pour préciser la visée. La lumière traversait une glace sans tain MM', un objectif BC, et arrivait sur le miroir O, qui la renvoyait à un miroir concave D, lequel était exactement au foyer du point A; là, elle

Fig. 529.



se réfléchissait vers O. Quand le miroir O restait immobile, les rayons revenaient alors sur leurs pas jusqu'au point A; une partie se réfléchissait sur la glace MM', formait une image α qu'on observait avec une loupe et que l'on faisait coïncider avec un repère fixe R. Mais lorsqu'on mettait la turbine en mouvement, les rayons qui revenaient de D en O ne trouvaient plus le miroir dans la même position, et se réfléchissaient dans une direction différente; l'image formée était en α' et ne coïncidait plus avec le repère R. En mesurant la déviation de cette image et la vitesse de rotation de la turbine, on a le moyen de déterminer la vitesse de la lumière.

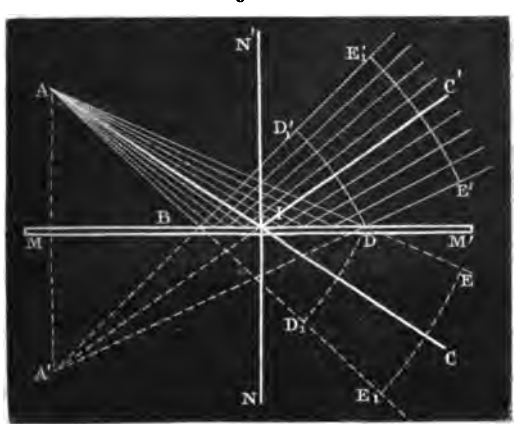
Cette détermination a été faite par Foucault en 1865; il a trouvé 298000 kilomètres au lieu de 308000. Pour comparer la vitesse de la lumière dans l'air et dans l'eau, Foucault avait disposé un second miroir E et un tube plein d'eau FF'; les rayons renvoyés par les miroirs D et E éprouvaient des retards différents, parce que les derniers traversaient deux fois la colonne d'eau FF'; ils ne rencontraient donc pas le miroir tournant dans des conditions identiques, et les images visées par la loupe en K ne coïncidaient pas. L'image aérienne était toujours moins déviée que celle qui se formait à travers l'eau. Ainsi *la lumière va plus vite dans l'air que dans l'eau.* Ce résultat fut confirmé par MM. Fizeau et Breguet au moyen de l'appareil d'Arago, quelques semaines après M. Foucault.



. image des fils croisés en coïncidence avec le réticule, comme ɑient en un point A′ symétrique de A. Donc la lumière, en-'e point A, qui se réfléchit sur une surface plane M, *est dans* *conditions physiques que si elle partait d'un point* A′ *symé-* \ *par rapport au miroir.* A′ est ce que l'on nomme l'*image vir-* ʌ.

ı que la réflexion revient à ceci : les ondes lumineuses DD_1, *fig.* 531), parties du point A, se trouvent transformées en d'autres

Fig. 531.



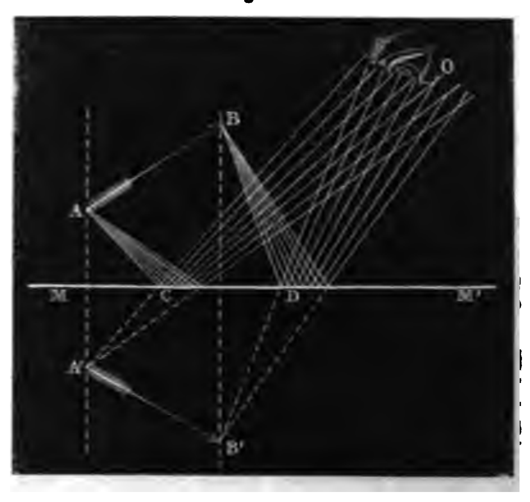
·les symétriques DD′, $E'E'_1$, qui ont pour centre le point A′, image du ɪnt A.

En général, on interprète comme il suit la loi de la réflexion. On sup-ɪse que l'effluve lumineuse émanée de A soit décomposée en rayons élé-ɪentaires tels que AIC, et l'effluve réfléchie décomposée de la même ma-ière en rayons tels que A′IC′, et l'on dit : 1° *qu'à un rayon incident* AI *orrespond un rayon réfléchi* IC′; 2° *que le plan d'incidence* AIN′, *mené* *ar le rayon incident et la normale* IN′ *est confondu avec le plan de ré-flexion* N′IC′; 3° que *l'angle d'incidence* AIN′ *est égal à l'angle de ré-flexion* N′IC′.

Image d'un objet. — Si la lumière part d'un objet AB (*fig.* 532), chacun de ses points A ou B a son image virtuelle en A′ ou B′, et l'œil, placé en O, reçoit les faisceaux réfléchis comme s'ils étaient envoyés par un objet symétrique A′B′. L'angle de AB avec son image A′B′ est double de celui que fait AB avec la surface MM′ du miroir. D'où il résulte qu'un

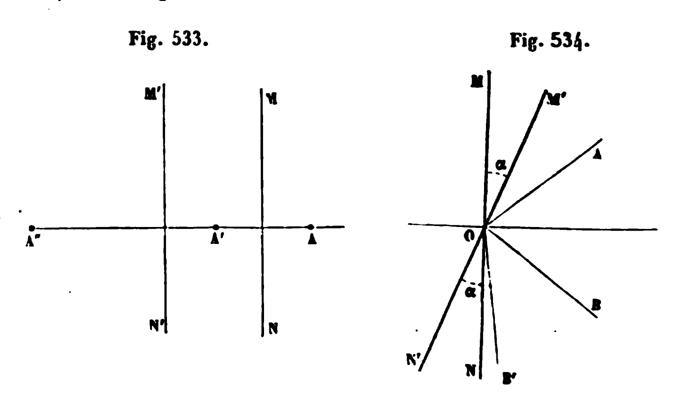
objet vertical est vu horizontal dans un miroir incliné à 45 degrés, et réciproquement.

Fig. 532.



Déplacement de l'image. — Si un miroir MN se déplace parallèlement à lui-même d'une quantité a jusqu'en M'N' (*fig.* 533), l'image qui était en A' à une distance de A égale $2d$, se place en A" à une distance $2(d+a)$. La différence A'A", c'est-à-dire le déplacement de l'image, est $2a$; elle est égale au double du mouvement du miroir.

Fig. 533. Fig. 534.

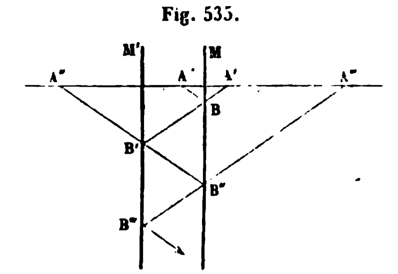


Il en est de même pour le cas où le miroir se déplace angulairement.

Soient MN (*fig.* 534) le miroir, AO et OB les rayons incident et réfléchi, leur angle AOB est double de l'angle d'incidence ou égal à $2i$. Si le miroir tourne de α et se place en M'N', l'angle d'incidence augmente de α, devient $i+\alpha$, et l'angle des rayons incident et réfléchi est $2(i+\alpha)=2i+2\alpha$; le rayon réfléchi a donc tourné de 2α.

Réflexion sur deux miroirs parallèles. — Soient M, M' (*fig.* 535) deux miroirs parallèles, A un point lumineux. Il formera derrière M une première image A', qui pourra être considérée comme centre de rayonnement et donnera derrière M' une nouvelle image symétrique A"; à son tour, celle-ci donnera une troisième image A‴ derrière M, et ainsi de suite.

Fig. 535.



Si l'on veut connaître la marche des rayons, il faut tirer les deux systèmes de parallèles AB, A"B",... et A'B', A‴B‴,..., qui font avec les miroirs des angles égaux; leurs intersections avec la normale AA' sont les images et la ligne ABB'B"B‴ est la route des rayons. On obtient une seconde série d'images, en commençant par le miroir M'.

Réflexion sur des miroirs inclinés. — Si les glaces sont inclinées et se coupent en un centre O, les images, auxquelles nous conservons les mêmes lettres, sont distribuées sur la circonférence décrite du point O (*fig.* 536). Elles sont en nombre infini; mais quand l'angle α des miroirs est une partie

Fig. 536.

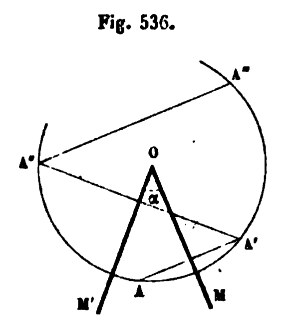
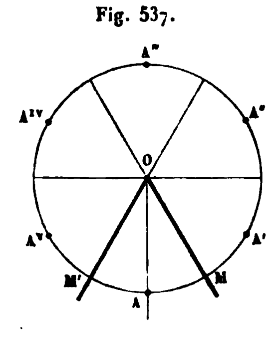


Fig. 537.



aliquote de la circonférence, les images d'un ordre élevé se superposent

[illegible] ces images [illegible] si on incline le [illegible] deux glaces [illegible] de 60 degrés [illegible] superposition de [illegible] (fig. 53[illegible]) [illegible] les effets [illegible] des deux glaces [illegible] images (fig. 53[illegible]). L'image [illegible] formée par les deux glaces [illegible] dans M [illegible] dans M' [illegible] se trouve [illegible] dans NOM'.

II. — [redacted].

On peut avoir une idée générale du phénomène de [illegible] faisant arriver un faisceau solaire dans une chambre obscure [illegible] obliquement à travers une cuve pleine d'eau (fig. 53[illegible]) [illegible]

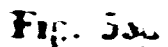
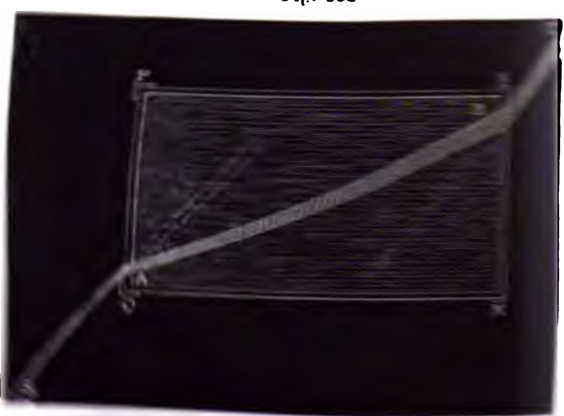


Fig. 53[illegible].

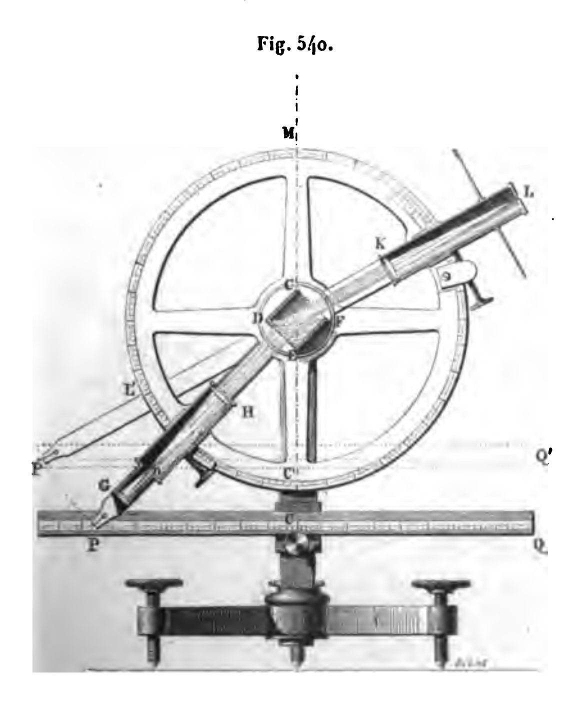


[illegible] qu'il suit. On constate ainsi qu'il se rappro[illegible] [illegible] dans l'eau, que la déviation est nulle sous [illegible]

cidence perpendiculaire, qu'elle augmente avec l'inclinaison jusqu'à une valeur limite et que, dans les cas où la deuxième surface est parallèle à la première, le faisceau reprend sa direction primitive en sortant de l'eau pour rentrer dans l'air.

Loi de Descartes. — Pour trouver les lois de la réfraction, on peut d'abord faire une expérience approximative qui est due à Descartes. On prend un cercle divisé vertical (*fig.* 540) et l'on fait arriver à travers un

Fig. 540.

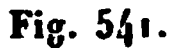


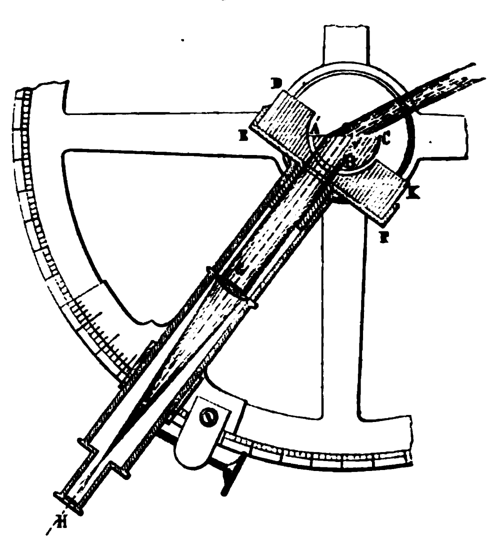
tube LK les rayons solaires, qui sont à peu près parallèles; on les reçoit dans une auge DCEF, mobile autour du centre, et dont le fond DE est normal au tube HG. Quand les alidades sont convenablement réglées, la lumière qui a traversé LK se réfracte en pénétrant dans le liquide, en sort normalement à DE, sans déviation nouvelle, et traverse HG. L'*angle d'incidence i* est l'angle compris entre la verticale MCC' et l'alidade LKL'P; l'*angle de réfraction r* est l'angle compris entre MCC' et PGH; les sinus de ces angles sont mesurés par les distances P'C' et PC, que l'on compte sur une règle divisée PQ. Or l'expérience prouve que le rapport de ces deux

sinus est invariable et égal à 1,333, si l'auge contient de l'eau. Si l'on change le liquide, on trouve que le rapport des deux sinus demeure constant pour chaque substance, mais qu'il varie de l'une à l'autre ; il sera 1,67 pour le sulfure de carbone, 1,47 pour l'huile d'olive, 1,37 pour l'alcool, etc. En général, nous le représenterons par n et nous le nommerons *indice de réfraction*. La loi qui vient d'être énoncée a été découverte par Descartes et porte son nom ; elle est exprimée par la formule

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n.$$

Quand on veut opérer avec des solides, on peut remplacer l'auge par un prisme ou par l'appareil de Boscovitch (*fig.* 541). C'est une gouttière cylindrique DEFK, fixée normalement à l'alidade GH, avec laquelle elle se


Fig. 541.

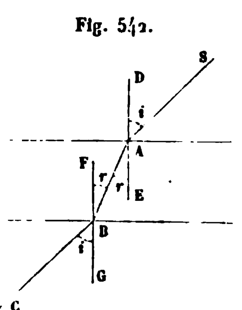


meut. Dans cette gouttière est un demi-cylindre de verre ABC, dont la face AC reste toujours horizontale. On retrouve ainsi la loi de Descartes.

En réalité, les lois de la réfraction sont plus complexes que nous ne venons de le dire ; elles dépendent non-seulement de la nature des milieux en contact, mais de certaines qualités inhérentes aux lumières qu'on étudie, ainsi que nous l'expliquerons plus loin.

Indice de retour. — L'expérience prouve qu'une lame à faces parallèles (*fig.* 542), placée entre une lunette et un objet très-éloigné, ne déplace jamais l'image. Cela montre que les rayons incidents SA et les rayons émergents BC sont parallèles et font le même angle i avec la normale; on a donc, pour le retour du rayon AB dans le milieu ambiant,

Fig. 542.

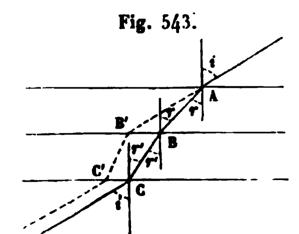


$$\frac{\sin \mathrm{ABF}}{\sin \mathrm{CBG}} = \frac{\sin r}{\sin i} = \frac{1}{n}.$$

En général, lorsque l'indice, au passage de l'air dans un milieu, est n, l'*indice pour le retour* de ce milieu dans l'air est $\frac{1}{n}$.

Indice relatif. — Les images ne sont pas déplacées davantage quand on superpose deux lames à faces parallèles dont les indices respectifs sont n et n'; cela prouve que les rayons incidents et émergents font le même angle i avec la normale (*fig.* 543). On aura successivement

Fig. 543.



$$\frac{\sin i}{\sin r} = n, \quad \frac{\sin r}{\sin r'} = x, \quad \frac{\sin r'}{\sin i} = \frac{1}{n'};$$

en multipliant membre à membre,

$$1 = \frac{nx}{n'}, \quad x = \frac{n'}{n}.$$

Donc *l'indice, au passage d'un premier milieu dans un second, est égal au rapport des indices du second et du premier milieu;* on l'appelle l'*indice relatif* des deux milieux. Les *indices absolus* se rapportent au passage du vide dans un milieu réfringent.

Discussion de la loi de Descartes. — D'après la formule $\sin i = n \sin r$, on voit que, n étant plus grand que l'unité, l'angle r est plus petit que i; qu'il est nul quand $i = 0$; qu'il croît avec i, et que, pour l'incidence rasante, il atteint un maximum r, que l'on nomme l'*angle limite*, et qui est donné par la formule

$$\sin r = \frac{1}{n}.$$

Donc un faisceau continue son chemin en ligne droite, s'il est normal







[illegible] la normale et [illegible] angle d'incidence [illegible] l'angle d'émergence [illegible]

$$[illegible] \quad i = 90°.$$

s quand un rayon arrive sous une incidence plus grande que l'angle ite, on trouve

$$\sin r > \frac{1}{n}, \quad \sin i > 1.$$

formule répond par une impossibilité; elle ne s'applique plus, et il faut sulter l'expérience. L'expérience prouve qu'il n'y a plus de rayon ré-cté, et qu'il se produit un phénomène nouveau et très-important.

En même temps qu'un rayon tel que SI donnait naissance à un rayon racté IS', il produisait aussi un faisceau intérieur réfléchi, qui était peu tense; mais aussitôt que la lumière SI_2 cesse de se réfracter, le faisceau léchi I_2P_2 devient très-vif. Les mesures photométriques font reconnaître 'il contient toute la lumière incidente, ou que la réflexion est *totale*.

Image d'un point vu par réfraction. — Considérons un point A (*fig.* 546) situé au-dessous de la surface XX d'un liquide. Un rayon AB, qui se réfracte au point B, sort suivant BD; un rayon très-voisin AC sort dans la direction CE, et comme l'angle de réfraction augmente avec l'angle d'incidence, les rayons réfractés BD, CE sont divergents comme AB, AC. Si on les prolonge en arrière, ils se rencontrent en A'; A' est l'image virtuelle du point A, vu par réfraction. Elle est plus élevée que A; on sait, en effet, que les objets qui se trouvent au fond de l'eau paraissent relevés par la réfraction.

Fig. 546.

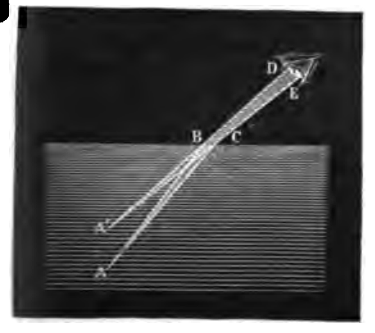
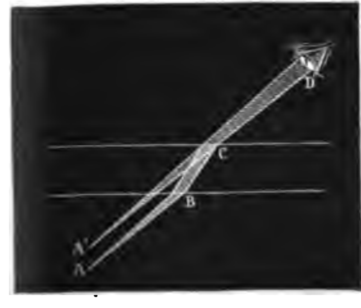


Fig. 547.



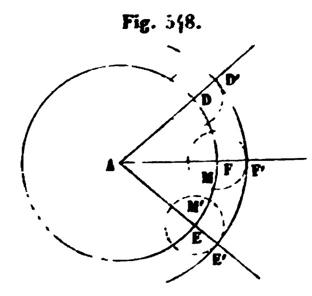
L'image d'un objet que l'on regarde à travers une lame à faces parallèles éprouve un déplacement latéral. Nous avons vu (*fig.* 543) que les rayons qui sortent de la lame sont parallèles aux rayons incidents; mais l'image A' qu'ils forment ne coïncide pas avec l'objet A (*fig.* 547).

III. — THÉORIE ONDULATOIRE.

Nous allons montrer comment les lois de la propagation de la lumière s'expliquent par la théorie des ondes.

Propagation rectiligne. — Soit A un point lumineux (*fig.* 548). Il est en vibration comme un point sonore; chacun de ses mouvements successifs se transmet dans l'éther et arrive en même temps sur des sphères concentriques. Considérons en particulier l'une d'elles, EFD; elle est l'intermédiaire nécessaire entre A et les parties les plus éloignées. On peut dire que c'est elle qui leur envoie la lumière; que tous les éléments D, E, F vibrent, et qu'ils transmettent leurs mouvements comme s'ils étaient autant de centres lumineux. Décrivons de ces points des sphères avec un même rayon : elles seront toutes tangentes, en des points D′, F′, E′, à une autre sphère D′F′E′, qui est une nouvelle surface d'onde. On voit qu'elle est l'enveloppe de toutes les ondes élémentaires parties de D, F, E.

Fig. 548.



Or les points A, D, D′ sont en ligne droite ainsi que A, F, F′ ou que A, E, E′. Par conséquent, le mouvement lumineux est rectiligne, et, *dans son ensemble*, le flux émis par A est en réalité composé de rayons tels que AFF′.

Cette explication montre bien que le point F′ reçoit le premier mouvement de F, elle ne prouve pas qu'il ne lui en vient pas d'autres des points voisins de F, tels que M, M′. Nous prouverons dans la suite que ces points détruisent réciproquement leurs effets en F′.

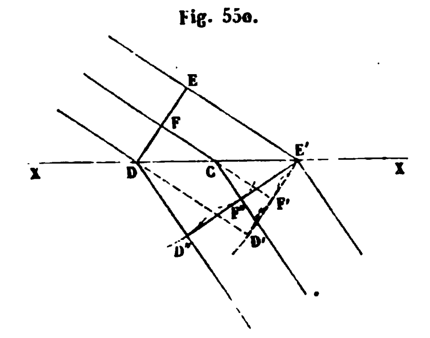
Réflexion. — Le faisceau total rencontrant une surface XX (*fig.* 549), chacun des points B, C, E′ est ébranlé, il vibre et devient le centre d'un mouvement qu'il transmet, soit au-dessus, sois au-dessous. C'est ce qui constitue la réflexion ou la réfraction. A partir du moment où l'onde a rencontré le point B jusqu'à celui où elle arrive en D′, le point B a commencé à vibrer et a transmis son mouvement à une distance égale à BD′. Décrivons donc une sphère de B comme centre, avec un rayon BD″ = BD′ : elle marquera le lieu d'arrivée dans le milieu supérieur de l'onde réfléchie par B. Répétons la même construction pour tous les points de BCE : toutes les sphères auront deux enveloppes : l'une D′F′E′, qui serait l'onde

directe et dont le centre est en A, l'autre D''F''E'', qui est l'onde réfléchie et qui a pour centre le point symétrique A'. Les rayons réfléchis semblent donc venir de l'image A'.

Fig. 549.

Réfraction. — Pour expliquer la réfraction, considérons le cas où le point lumineux est à l'infini, c'est-à-dire celui où les ondes incidentes successives DFE, D'F'E',... sont planes (*fig.* 550). Depuis le moment où le front de l'onde a occupé le plan DE jusqu'à celui où il est parvenu en D'E', il a parcouru dans le temps t et avec la vitesse v, un espace $DD' = vt$. A partir du premier moment jusqu'au second, le point D de la surface de séparation s'est mis en vibration, et l'onde émise par lui est arrivée dans le milieu inférieur sur une sphère dont le rayon DD'' a été parcouru pendant le même temps t, mais avec une vitesse différente v', et qui est égal à $v't$. Si nous répétons la même construction pour tous les points de DE', toutes les sphères seront tangentes au plan D''F''E', qui sera l'onde réfractée. Or on a

Fig. 550.



$$DD' = vt = DE'.\sin i, \quad DD'' = v't = DE'.\sin r,$$

et en divisant

$$\frac{DD'}{DD''} = \frac{v}{v'} = \frac{\sin i}{\sin r}.$$

Donc : 1° le rapport des sinus d'incidence et de réfraction est constant; 2° il est égal au rapport direct des vitesses dans les deux milieux. Ces

[illegible]

conclusions [illegible]

[illegible] qu'au [illegible]

[illegible] que [illegible]

[illegible] la lumière [illegible]

[illegible] ce qui [illegible]

[illegible]uirait, au contraire [illegible]

[illegible] dans l'air [illegible]

...e et dont le centre e...
... a pour centre le ...
... de l'image A

CHAPITRE III.

MIROIRS ET LENTILLES.

I. — MIROIRS CONCAVES.

...ière est réfléchie par un miroir courbe, nous pouvons ...que élément de la surface agit comme un petit miroir ... que les rayons incident et réfléchi sont dans le même ...ale à l'élément, et font des angles égaux avec cette ligne. ...roirs sphériques creux; chaque diamètre de la sphère ...; celui qui aboutit au milieu M du miroir s'appelle *axe*

...ipal. — Supposons qu'un rayon SN arrive parallèlement ...al AM (*fig.* 551); il sera réfléchi dans la direction NF, la normale NO fera des angles égaux à i, d'abord avec NF, ensuite avec NS ou OF, le triangle ONF sera isoscèle et OF égal à NF. Si l'*ouverture* du miroir n'est pas très-grande, c'est-à-dire, si l'angle MON ne dépasse pas un petit nombre ..., MF différera peu de NF, et nous pourrons admettre que OF = MF. ... rayons parallèles à l'axe principal sont concentrés au milieu du ...) en un point F, qu'on appelle *foyer principal*. MF est la *distance* ...*rincipale*. Inversement des rayons partis du point F seraient ... suivant des lignes NS parallèles à l'axe principal.

Fig. 551.

...r conjugué. — Supposons maintenant que les rayons viennent ...oint P, situé sur l'axe principal au delà du centre de courbure ...52). Le rayon PN se réfléchit vers NP'. La droite NO étant bissec... de l'angle PNP', les segments PO et P'O sont entre eux comme PN ...N, et si l'ouverture du miroir n'est pas considérable, nous pourrons ...dre PM pour PN et P'M pour P'N. Par conséquent

$$PO : P'O :: PM : P'M.$$

Si nous désignons PM et P'M par p et p' et le rayon MO par r, nous avons

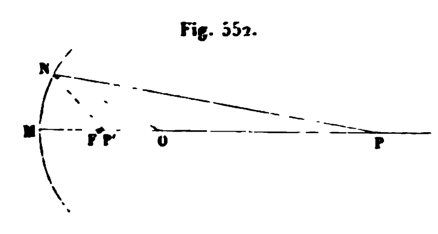


Fig. 552.

$PO = p - r$, et $P'O = r - p'$. La proportion ci-dessus devient

$$p - r : r - p' :: p : p'.$$

ou bien

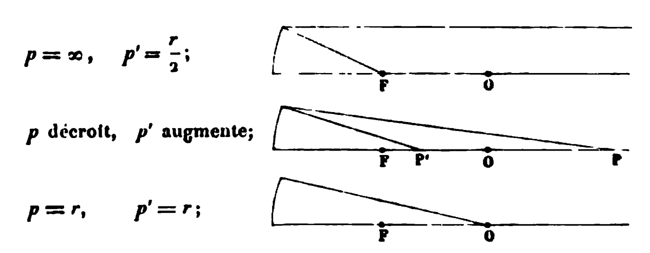
$$(1) \qquad \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{2}{r}.$$

Cette formule montre que tous les rayons partis d'un point P concourent, après la réflexion, au point P'; P' est le foyer du point P. Réciproquement, les rayons partis de P' viendront converger en P. Pour cette raison, P et P' se nomment *foyers conjugués*, et les distances p et p' *distances focales conjuguées*.

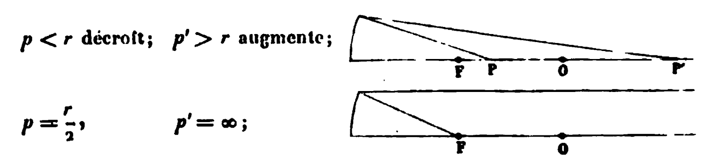
La formule (1) donne la suivante :

$$(2) \qquad p' = \frac{r}{2 - \frac{r}{p}}.$$

Discussion. — En discutant cette formule, on trouve les valeurs suivantes de p' : 1° quand le point P se rapproche de l'infini jusqu'au centre



2° Si l'on rapproche encore le point lumineux, P prend les places qu'occupait précédemment le foyer P' et réciproquement, comme il suit :



3° Supposons maintenant que p soit plus petit que $\frac{r}{2}$, la formule (2)

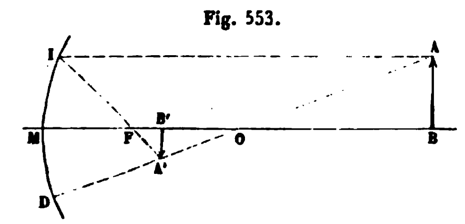
donne pour p' un nombre négatif; cela veut dire que les rayons ne se rencontrent pas en avant du miroir, mais que, prolongés en sens inverse, ils peuvent être considérés comme partant du point P' que l'on nomme *foyer virtuel*. On a :

$p < \frac{r}{2}$ décroît; p' négatif décroît;

$p = 0,\qquad p' = 0.$

Axe secondaire. — Si le point lumineux, au lieu d'être placé en B, (*fig.* 553) est en A, au-dessus de l'axe principal, on mène le diamètre AO qu'on nomme *axe secondaire;* il est clair que les rayons partis de A viendront faire un foyer en A', et que ce point est sensiblement sur la verticale du foyer B' de B, si l'on peut supposer OA = OB, c'est-à-dire quand AB est très-petit.

Fig. 553.



Soit maintenant un objet lumineux AB, le point B fera son foyer en B', le point A sur l'axe secondaire AO, en A', et tous les points intermédiaires feront le leur entre A' et B'. Pour construire simplement le lieu de ces foyers, on mène un rayon AI parallèle à l'axe principal, on joint le point I au milieu E de MO; la ligne IF est le rayon réfléchi, et le point A' où il rencontre l'axe secondaire AO est le foyer du point A; on abaisse ensuite sur l'axe la perpendiculaire A'B'.

Or tous les rayons partis d'un point tel que A, après s'être réfléchis, passent par le point A', se croisent et continuent leur route en divergeant comme si A' était un point lumineux. L'œil placé derrière A'B' croit donc voir un objet lumineux; A'B' se nomme l'*image réelle* de AB. On peut la rendre visible en plaçant sur A'B' un écran de papier translucide qui reçoit les rayons et les diffuse dans tous les sens.

Cette image est renversée, sa grandeur I se détermine comme il suit. Désignons par O la dimension de l'objet, on a, en tenant compte du retournement,

$$\frac{I}{O} = -\frac{A'B'}{AB} = -\frac{OB'}{OB} = -\frac{p'}{p},$$

$$(3)\qquad \frac{I}{O} = -\frac{p'}{p}.$$

En discutant les formules (2) et (3), on est conduit au tableau suivant qui fait connaître le lieu, la grandeur et la position des images :

$p=\infty$, $p'=\frac{r}{2}$, $-\frac{I}{O}=0$;

p décroît, p' croît, $-\frac{I}{O}<1$ croît;

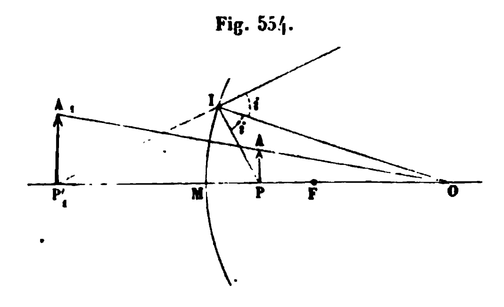
$p=r$, $p'=r$, $-\frac{I}{O}=1$;

$p<r$ croît, $p'>r$ croît, $-\frac{I}{O}>1$ croît;

$p=\frac{r}{2}$, $p'=\infty$, $-\frac{I}{O}=\infty$.

Si le point lumineux est placé entre le foyer et le miroir, on sait que p' est négatif, c'est-à-dire que le foyer est virtuel et qu'il se rapproche depuis l'infini jusqu'à zéro. Donc $\frac{I}{O}$ est positif, c'est-à-dire que l'image est droite et qu'elle diminue depuis l'infini jusqu'à zéro, quand le point P se rapproche jusqu'à toucher le miroir. La marche des rayons est indiquée *fig.* 554.

Fig. 554.

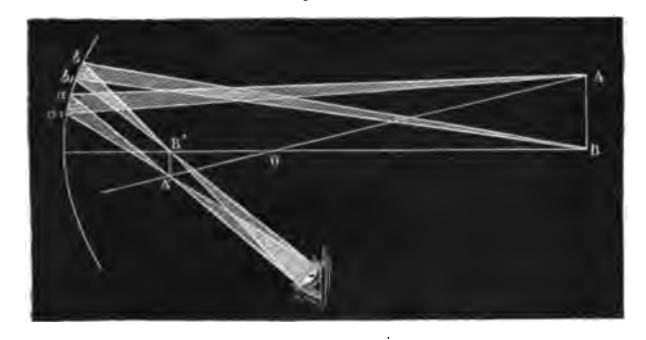


Vérification expérimentale. — Pour vérifier ces divers résultats, il suffit de placer une bougie en face du miroir, d'abord à grande distance, et de la diminuer peu à peu. On reçoit les rayons réfléchis sur un petit écran de papier huilé; quand il est au point où se forme l'image réelle, celle-ci paraît nette sur ce papier, parce que les rayons convergents qui la forment sont renvoyés en tous sens.

Pour voir l'image réelle A'B' directement, il faut placer l'œil en un point

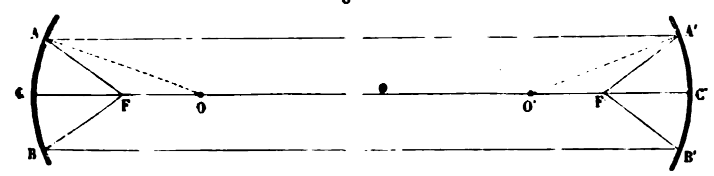
où il puisse recevoir à la fois des rayons venus de A′ et des rayons venus de B′, comme le montre la *fig.* 555.

Fig. 555.



Miroirs conjugués. — On place vis-à-vis l'un de l'autre, à 50 ou 80 mètres de distance, deux miroirs dont les axes OC, O′C′ sont confondus (*fig.* 556). Il est clair qu'un foyer allumé en F, enverra sur le pre-

Fig. 556.



mier miroir un cône de rayons AFB qui se réfléchiront, et seront renvoyés parallèlement à l'axe en un faisceau cylindrique AA′, BB′. Ce faisceau se transmettra dans l'espace sans s'affaiblir, puisque son étendue ne varie pas. Il se réfléchira sur le second miroir et se concentrera en F′, où il formera une petite image très-limitée et très-brillante. En même temps que la lumière, la chaleur se concentre en ce point, et si on place en F′ une fusée, elle s'allume. Au lieu d'un foyer, il vaut mieux placer en F une lampe électrique qui est plus limitée et forme un foyer très-petit, mais très-chaud, comme le montre la *fig.* 557.

C'est sur ces propriétés que repose l'emploi des *miroirs ardents*, qui concentrent les rayons solaires à leur foyer et peuvent servir à enflammer des matières combustibles. Ces miroirs étaient connus des anciens; la tradition veut qu'Archimède s'en soit servi pour embraser la flotte romaine pendant le siége de Syracuse. Buffon obtint des effets très-puis-





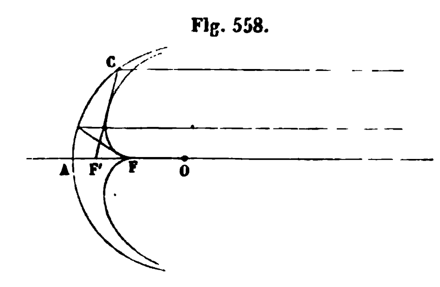
Fig. [illegible].

sants à l'aide d'un système de petits miroirs plans articulés, qui pouvaient être disposés de manière à produire une surface à peu près sphérique.

Miroirs paraboliques. — Les miroirs paraboliques réalisent plus exactement que les miroirs sphériques la concentration des rayons parallèles en un foyer unique ; cela résulte des propriétés géométriques de la parabole. Inversement, les rayons partis du foyer de la parabole sont exactement parallèles après la réflexion. C'est par cette raison que les miroirs paraboliques sont employés comme réflecteurs dans les phares.

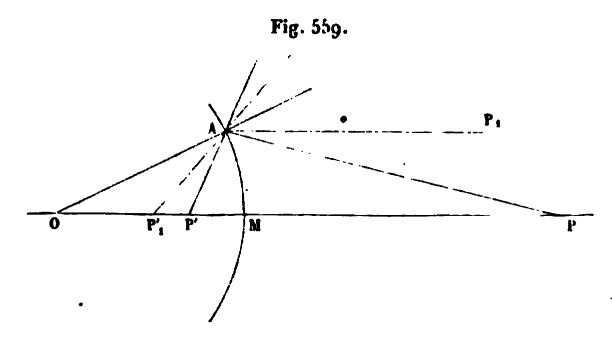
Aberration de sphéricité. — Caustique. — Quand on fait réfléchir des rayons parallèles à l'axe sur un miroir sphérique de grande ouverture, on n'a pas un foyer unique. Les rayons qui ont été réfléchis au voisinage du sommet A passent au foyer principal F (*fig.* 558) ; ceux qui tombent aux bords en C, arrivent en F' : l'écart FF' se nomme l'*aberration de sphéricité*. Il résulte de là que les rayons réfléchis se croisent et forment, par leur intersection, une surface de révolution qu'on nomme *caustique*, et qui est figurée ci-contre ; on la rend visible en recevant les rayons réfléchis sur un carton placé devant le miroir dans un plan diamétral.

Fig. 558.



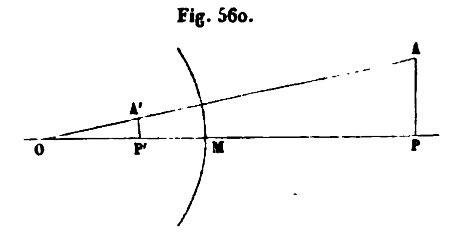
Miroirs convexes. — Une surface sphérique convexe AM est polie extérieurement (*fig.* 559) ; un rayon P_1A parallèle à l'axe se réfléchit, s'écarte de l'axe, et il est dans les mêmes conditions que s'il partait de P'_1. P'_1 est

Fig. 559.



le foyer principal virtuel; on démontre qu'il est au milieu du rayon OM.

Fig. 560.

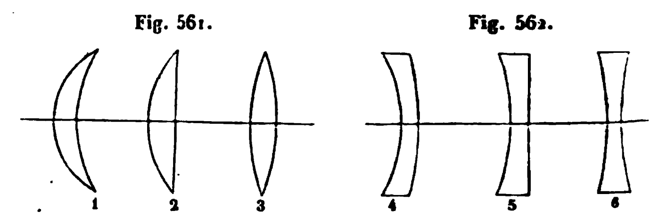


Si un objet AP (*fig.* 560) est devant le miroir, il donne une image A'P' droite, virtuelle, et plus petite que l'objet.

II. — LENTILLES.

Dans la construction des instruments d'optique, on fait usage de verres terminés par deux surfaces sphériques et qu'on nomme *lentilles*. On les partage en deux classes: les lentilles à bords minces et à centre épais, qui sont *convergentes* (*fig.* 561), et les lentilles à bord épais et à centre mince, qui

Fig. 561. Fig. 562.



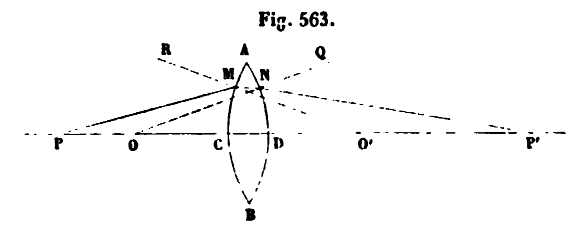
sont *divergentes* (*fig.* 562). L'axe principal est la droite qui joint les centres de courbure des deux surfaces. Considérons comme type de la première classe une lentille biconvexe, dont les centres de courbure sont en O et en O'.

Soit P un point lumineux (*fig.* 563), PM un rayon, l'angle d'incidence est POR, le rayon, en se réfractant dans la lentille, se rapproche de la normale MO' et prend la direction MN; il fait en N un angle d'incidence MNO' et sort en s'écartant de ON suivant NP'. En résumé, il a été infléchi vers l'axe et le rencontre en P'. On démontrera tout à l'heure que tous les rayons partis de P passent en P'; ce point P' est le foyer conjugué de P.

Il est clair que si P se rapproche de la lentille, l'angle d'incidence PMR augmente, ainsi que l'angle MNO, tandis que les angles en N diminuent et P' s'éloigne de la lentille; par conséquent : 1° si P est à l'infini, le foyer

est le plus près possible de la lentille, c'est le foyer principal; 2° si P s'approche, P' s'éloigne; 3° il y a une position de P telle, que P' et P sont aux

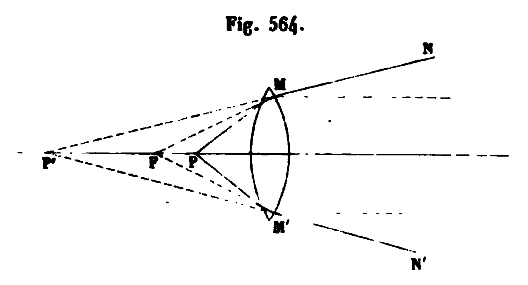
Fig. 563.



mêmes distances; 4° quand P sera au foyer principal, les rayons émergents seront parallèles et P' sera à l'infini.

Enfin si P est entre le foyer principal F et la lentille (*fig.* 564), les rayons

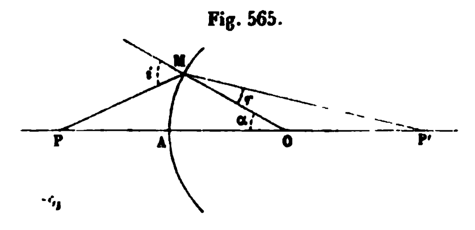
Fig. 564.



PM et PM', devenant plus divergents, ne seront pas ramenés au parallélisme par la lentille et divergeront encore à la sortie en MN et M'N'; mais si on les prolonge en sens inverse, ils rejoignent l'axe en P'. Ils sont dans les mêmes conditions physiques que s'ils partaient de ce point; c'est encore un foyer, mais un *foyer virtuel*. En résumé, il y a la plus grande analogie entre le miroir concave et la lentille biconvexe.

Calcul des foyers. — Considérons d'abord un milieu terminé d'un côté par

Fig. 565.



la surface sphérique AM dont le centre est en O (*fig.* 565). Soit P un point

lumineux à une distance $AP = p$; construisons le rayon réfracté MP' qui rencontre l'axe à une distance $AP' = p'$. On a, dans les triangles PMO et P'MO,

$$\frac{OP}{MP} = \frac{\sin i}{\sin \alpha}, \quad \frac{OP'}{MP'} = \frac{\sin r}{\sin \alpha},$$

et, en divisant,

$$\frac{OP}{MP}\,\frac{MP'}{OP'} = \frac{\sin i}{\sin r} = n.$$

Or $OP = p + r$, $OP' = p' - r$, et si l'angle d'ouverture α est très-petit, on peut admettre que $MP = AP = p$, et que $MP' = AP' = p'$; en remplaçant il vient

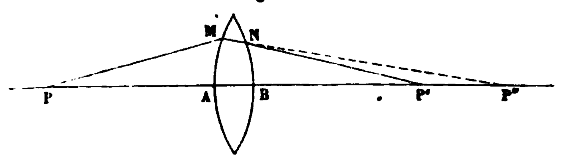
$$\frac{p+r}{p}\,\frac{p'}{p'-r} = n,$$

équation qui peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\frac{1}{p} + \frac{n}{p'} = \frac{n-1}{r}.$$

Cela étant, considérons une lentille biconvexe MNAB (*fig.* 566) dont nous négligerons l'épaisseur. Un point P placé en avant émet des rayons tels que PM.

Fig. 566.



Si le verre était indéfini, ils iraient converger en un point P'' à une distance p'', et l'on aurait, d'après la formule précédente,

$$\frac{1}{p} + \frac{n}{p''} = \frac{n-1}{r}.$$

Mais le milieu est limité par la surface NB, les rayons éprouvent une deuxième réfraction en N et arrivent en P'. S'il y avait un point lumineux en P' et qu'il envoyât un rayon P'N, il se réfracterait suivant MN et ferait un foyer en P'', qui serait situé à une distance $-p''$, et on aurait, en appelant r' le demi-diamètre de la surface NB,

$$\frac{1}{p'} - \frac{n}{p''} = \frac{n-1}{r'};$$

en éliminant p'', on a

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = (n-1)\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}\right),$$

et, si l'on pose

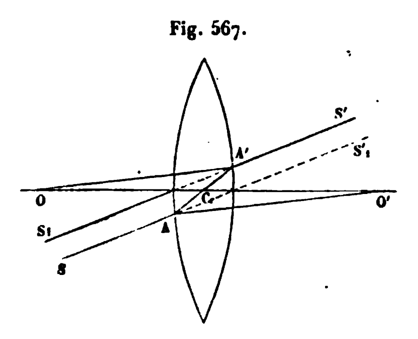
$$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}\right),$$

$$(\alpha) \qquad \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}.$$

C'est la formule du miroir concave dans laquelle $\frac{r}{2}$ est remplacé par f; par conséquent, une lentille biconvexe se comporte en tout comme un miroir concave dont la distance focale principale $\frac{r}{2}$ serait égale à f, à cette seule différence près que, pour le miroir, le foyer et le point lumineux sont du même côté de la surface et que dans la lentille ils sont l'un avant, l'autre derrière le verre.

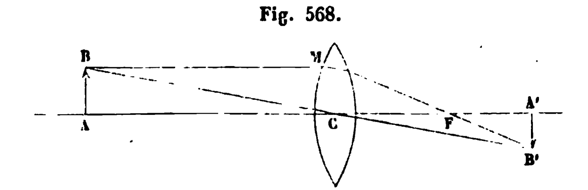
Centre optique. — Considérons, pour plus de simplicité, le cas où les rayons de courbure des deux surfaces sont égaux; prenons le point C, milieu de la lentille, et menons une ligne quelconque AA' (*fig.* 567). Par raison de symétrie, CA = CA', et les deux normales OA' et O'A sont parallèles; donc un rayon incident SA qui se réfracterait suivant AA' sortirait suivant A'S' parallèle à sa direction première, comme s'il avait traversé un milieu à faces parallèles; et, si la lentille est peu épaisse, on pourra dire que A'S' est confondu avec le prolongement de AS. Le point C se nomme le *centre optique de la lentille;* il est caractérisé par cette propriété, que les rayons lumineux qui y passent traversent la lentille sans être déviés.

Fig. 567.



Axe secondaire. — Images. — Supposons maintenant qu'un point lumineux B (*fig.* 568) soit placé au-dessus de l'axe principal AA' de la lentille; parmi tous les rayons qu'il envoie, il y en a un, BC, qui passera par le centre optique, qui n'éprouvera aucune déviation et sur lequel sera le foyer de B; menons en second lieu un rayon BM parallèle à l'axe, il passera par le foyer principal F, qui est connu, et, comme il doit aussi passer par le foyer de B, ce point sera en B' à l'intersection de BC et de MF. Si l'on suppose

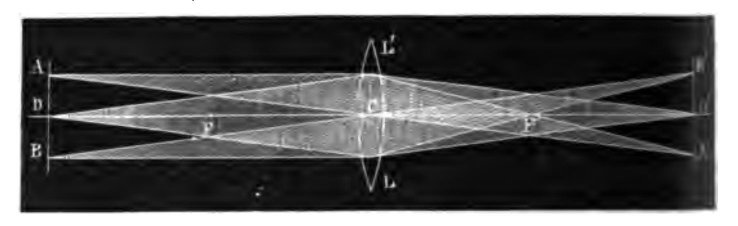
Fig. 568.



que BA est très-petit, BC et AC seront sensiblement égales, et le foyer de A se trouvera en A′ à une distance CA′ = CB′, à peu près sur la perpendiculaire abaissée de B′ sur l'axe.

La *fig.* 569 montre la marche de faisceaux lumineux partant de A, B, D, et venant se concentrer aux points A′, B′, D′; ils divergent ensuite et sont

Fig. 569.



dans les mêmes conditions que s'ils partaient de ces points A′, B′, D′, c'est-à-dire d'un objet lumineux réel. A′B′D′ est l'*image réelle* de ABD; on peut la voir en plaçant l'œil derrière, de manière à recevoir les rayons qui en sortent; on la rend visible de tous les points en plaçant en A′B′ un papier huilé qui diffuse la lumière dans tous les sens.

On voit que l'image est renversée, et, à cause des triangles semblables ADC, A′D′C, on a

$$(\beta)\qquad \frac{I}{O} = -\frac{p'}{p},$$

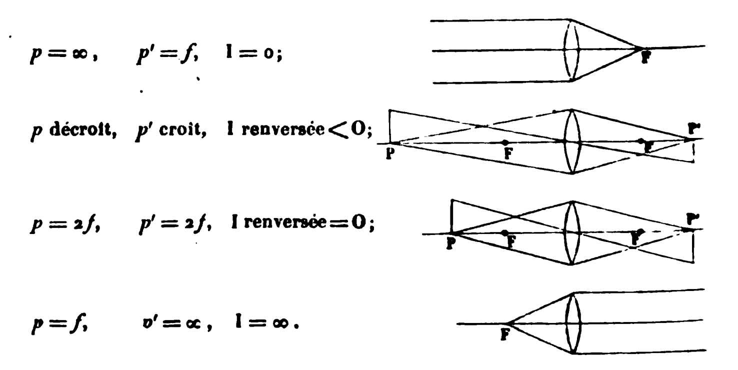
formule identique à celle des miroirs. Voici le tableau des positions et des grandeurs de l'image, qu'on obtient en discutant les formules (α) et (β), comme on l'a fait pour le miroir concave.

$p = \infty$, $p' = f$, $I = 0$;

p décroît, p' croît, I renversée $< O$;

$p = 2f$, $p' = 2f$, I renversée $= O$;

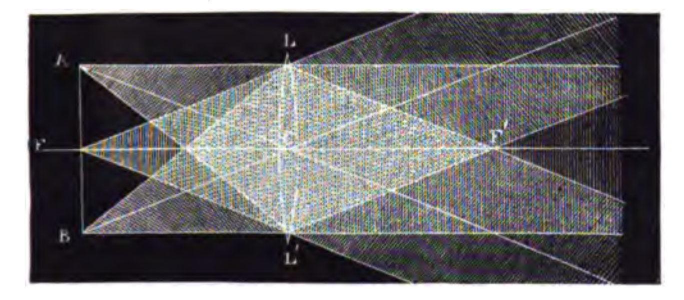
$p = f$, $p' = \infty$, $I = \infty$.



Dans ce dernier cas où $p = f$, le point A émet des rayons qui, à la

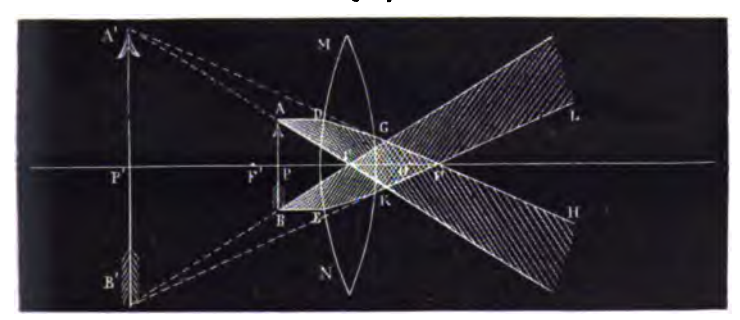
sortie, sont parallèles à l'axe secondaire AC (*fig.* 570), et, pour le point B, ils sont parallèles à BC. L'image est donc à l'infini, elle est comprise entre les lignes AC et BC, c'est-à-dire qu'elle est infinie en grandeur.

Fig. 570.



Quand l'objet est compris entre le foyer et la lentille, la formule indique que p' est négatif et que l'image est positive, c'est-à-dire droite ; voici comment on construit les rayons dans ce cas (*fig.* 571) : par un point A

Fig. 571.



on mène l'axe secondaire AC et un rayon horizontal AD, celui-là passe à la sortie par le foyer F ; or AC et GF se rencontrent en A' ; A' est le foyer virtuel de A, de même B' est celui de B : A'B' est donc l'image de AB.

Lentille biconcave. — Par un raisonnement analogue à celui qui a été fait pour les lentilles convexes, on trouve que la formule des lentilles biconcaves est

$$\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{f}.$$

Les rayons parallèles envoyés par un point à l'infini forment un foyer

virtuel F (*fig.* 5[illegible]), ils divergent après la réfraction [illegible] tant du point F.

Fig. [illegible]



L'objet étant en AB (*fig.* 5[illegible]), on construit l'image A'B' [illegible] rayon secondaire AC et un rayon AL parallèle à l'axe [illegible] [illegible] réfracté FLG, qui passe au foyer principal F et qui [illegible]

Fig. 5[illegible]3.



[illegible] A'. On construit de même le foyer B' du point B [illegible] image A'B'. Cette image est droite, virtuelle et plus petite que l'objet [illegible] en regardant un objet AB avec une lentille con[illegible] [illegible] rapprochée en A'B'. AB et A'B' se rapprochant [illegible] [illegible] à la limite ils se confondent avec elle.

CHAPITRE IV.

INSTRUMENTS D'OPTIQUE.

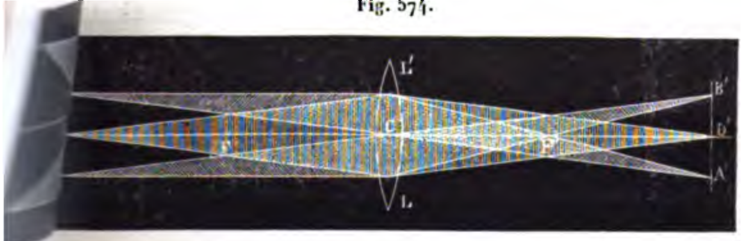
---

rand nombre d'instruments d'optique sont fondés sur les propriétés tilles; ils se divisent en deux classes, suivant qu'ils sont formés ul ou de plusieurs verres convergents ou divergents.

I. — INSTRUMENTS D'OPTIQUE SIMPLES.

se rappelle qu'un objet AB placé devant une lentille convergente en A'B' une image réelle et renversée (*fig.* 574), laquelle est agranu diminuée suivant que l'objet est plus près ou plus loin que le

Fig. 574.

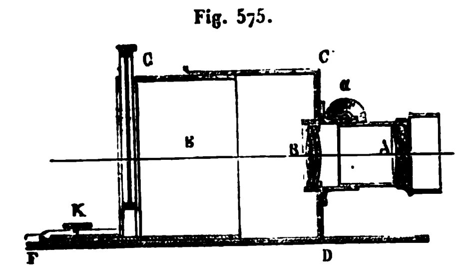


ouble de la distance focale principale. Cette propriété a conduit aux struments suivants.

Chambre obscure. — La chambre obscure utilise les images diminuées. On encadre la lentille LL' dans une ouverture percée à la paroi intérieure d'une boîte, l'image se fait au fond. Le modèle adopté pour la photographie (*fig.* 575) se compose d'une lentille achromatique B qui est fixe, et d'une seconde A qui est mobile au moyen d'un pignon *a*. En superposant ces deux lentilles on diminue la distance focale, puisqu'elles ajoutent leur convergence; et en faisant mouvoir l'une d'elles, on change un peu cette distance, ce qui permet de mettre l'image exactement au point. La caisse est composée de deux parties, l'une CD qui est immobile, l'autre E qui entre dans CD en glissant dans une charnière; elle se fixe à l'endroit voulu par un boulon K. Enfin, en G est une glace dépolie sur laquelle on

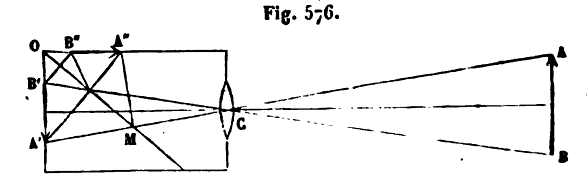
voit se peindre l'image des objets extérieurs, glace qu'on enlève à volonté, et qu'on remplace au moment de l'opération par le châssis contenant la plaque impressionnable.

Fig. 575.



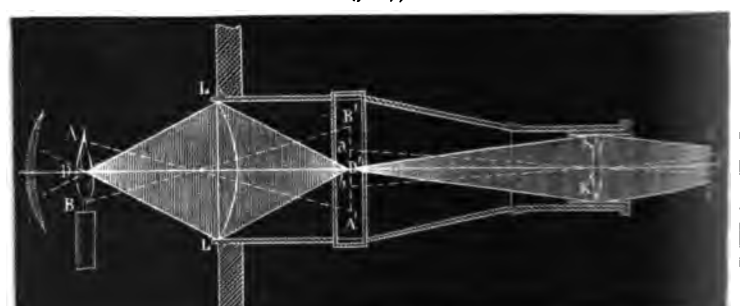
Avant l'invention de la photographie, on dessinait sur le verre G l'image des objets en suivant leur contour avec un crayon. Il était important de redresser ces images. On y parvenait de diverses manières; la plus simple était de les rendre horizontales en disposant au fond de la chambre une glace OM inclinée à 45 degrés (*fig.* 576). L'image ne se formait pas en B'A', mais en A"B", comme un dessin étalé sur une table horizontale.

Fig. 576.



Lanterne magique. — Cet appareil, inventé par le P. Kircher, se compose (*fig.* 577) d'une première lentille très-convergente LL', qui concentre en B'A' soit les rayons solaires, soit ceux d'une lampe électrique, soit la lumière de Drummond ou d'une lampe ordinaire. En B'A' se trouve une fente rectangulaire verticale dans laquelle on introduit un verre sur

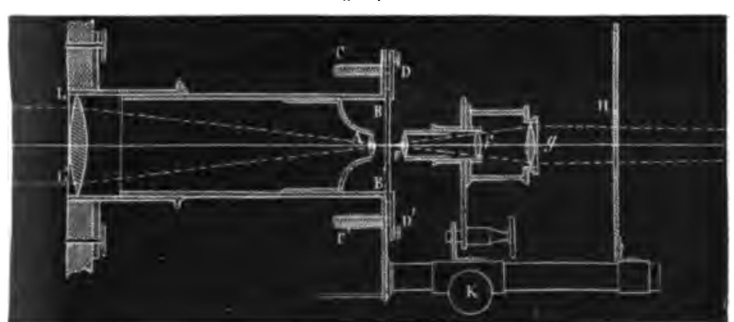
Fig. 577.



lequel on a exécuté des peintures transparentes ou une image photographique sur collodion. Ces peintures sont retournées; elles laissent passer ou arrêtent la lumière proportionnellement à la transparence de chacun de leurs points. En KK′ est une lentille très-convergente, qui donne de l'objet *ab* une image redressée très-agrandie, qu'on reçoit sur un écran pour la diffuser dans tous les sens. On met au point en déplaçant la lentille KK′ dans une coulisse.

Le microscope solaire n'est qu'un cas particulier de cet appareil (*fig.* 578) :

Fig. 578.

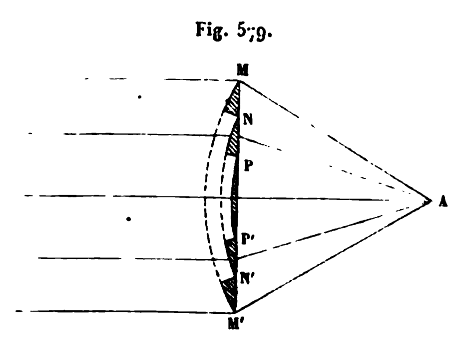


la lumière fixée par un héliostat est concentrée d'abord par la lentille LL′, ensuite par A sur un double verre BB′ où sont fixées les pièces microscopiques. La lentille de projection est formée par la superposition de trois verres *e*, *f*, *g*. On les approche ou on les éloigne par une crémaillère et un pignon K, jusqu'à ce que l'image soit nette sur l'écran.



Phares. — Quand un point lumineux A (*fig.* 579) est placé au foyer principal d'une lentille, les rayons AM, AN, etc., deviennent parallèles après la réfraction et forment un cylindre de lumière qui ne s'affaiblit que par le défaut de transparence de l'air. Fresnel a profité de cette propriété pour la construction des phares. Afin d'obtenir de grandes lentilles sans leur donner un poids très-considérable, il a songé à n'en garder que les bords MN, M′N′ et à

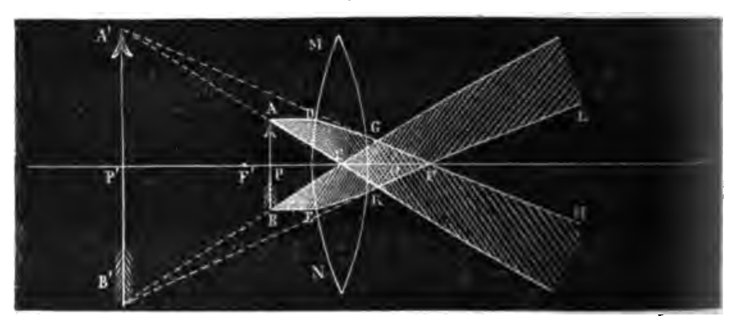
Fig. 579.



remplacer le milieu par des anneaux de plus en plus petits, qui ont tous le même foyer. En A est une lampe où l'huile monte par un mouvement d'horlogerie dans quatre mèches concentriques entre lesquelles circule l'air. Le phare entier est une grosse lanterne prismatique à huit pans, portant huit lentilles à échelons et éclairant huit directions différentes; un mouvement de rotation promène les huit cylindres de lumière dans toutes les directions, et montre en chaque point des éclats suivis d'éclipses.

Loupe. — Soit AB (*fig.* 580) un objet placé entre la lentille MN et le foyer F′ mais tout près de ce foyer. L'œil, placé en O, recevra les rayons

Fig. 580.



réfractés comme s'ils venaient de l'image virtuelle A′B′, c'est-à-dire d'un objet beaucoup plus grand que AB.

Nous ne voyons les objets distinctement qu'à une certaine distance Δ de l'œil, qui est d'ordinaire comprise entre 25 et 30 centimètres, et qu'on appelle *distance de la vision distincte*. Il faut donc que l'image A′B′ soit à cette distance Δ. On réalise cette condition en éloignant ou en rapprochant la loupe de AB.

Le grossissement G de la loupe est égal au rapport des dimensions de l'image et de l'objet. On a donc

$$G = \frac{A'B'}{AB} = \frac{p'}{p}.$$

Comme on place ordinairement l'œil contre la loupe, la distance Δ de vision distincte, est égale à p'; et comme d'un autre côté l'objet est presque au foyer principal, on peut admettre que $p = f$. Donc

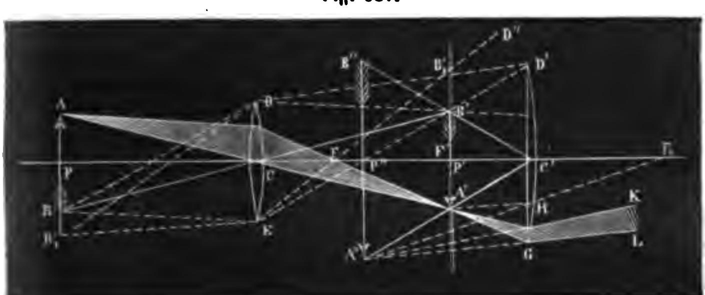
$$G = \frac{p'}{p} = \frac{\Delta}{f}.$$

On voit que le grossissement est d'autant plus grand que f est plus petit, et que la vision distincte est plus considérable. G représente le grossissement linéaire ; le grossissement superficiel serait G^2.

II. — THÉORIE DES INSTRUMENTS COMPOSÉS.

Les lunettes, les microscopes et les télescopes sont construits sur un plan commun qu'on va étudier généralement (*fig.* 581). En DE est une première lentille nommée *objectif*. Tout objet lumineux AB placé en avant d'elle, plus loin que la distance focale principale, fait une image réelle et renversée en A'B'. Tous les rayons partis d'un point tel que A se croisant

Fig. 581.



en A' divergent ensuite en continuant leur route, comme si A' était un point lumineux réel ; et les mêmes conditions étant réalisées pour toutes les parties de l'image A'B', on peut la considérer comme un véritable objet émettant de la lumière, que l'on peut regarder à travers une loupe GD'. On construit comme précédemment la marche des rayons à travers cette loupe. Parmi tous ceux qui partiraient du point A' s'il était réel, on choisit l'axe secondaire A'C' qui ne se dévie pas, puis un rayon A'H, parallèle à l'axe, qui, après la réfraction, passerait par le foyer F_1. La rencontre de C'A' et de F_1H détermine A", le foyer conjugué de A'. La figure montre comment le cône des rayons DAC se rencontre d'abord en A', diverge ensuite en suivant un cône opposé, et enfin se réfracte en HK, GL comme si les rayons venaient de A". Si l'œil est derrière la loupe et qu'il reçoive ces rayons, il verra l'image A", et il la verra distinctement quand elle sera à la distance de la vision distincte.

En résumé, l'instrument composé se borne à faire une image réelle très-rapprochée de l'observateur qui la regarde avec une loupe.

Diaphragme. — Champ. — On fixe dans le plan focal A'B' une lame de métal noirci, percée d'une ouverture circulaire. En même temps que l'image, l'œil voit distinctement les bords de cette ouverture qui encadrent le champ de vision. Il faut la placer nécessairement dans ce plan focal, car son contour est confus si on l'éloigne ou qu'on la rapproche. Il faut en outre que l'ouverture soit limitée au cône intérieur tangent aux lentilles DE et D'G, c'est-à-dire aux points A' et B'. En effet, B' est le sommet du cône DB'E, formé par les rayons réfractés qui viennent de B; ce cône est recueilli tout entier par l'oculaire D'G et peut entrer dans l'œil. Au contraire, le cône DB'_1E, qui vient de B_1 et se continue par $D'B'_1D'$, n'entre plus ni dans la lentille ni dans l'œil. Il suit de là que les cônes dont les sommets se trouvent entre B' et B'_1 ne seront recueillis que partiellement, et que le tableau focal des points compris entre B et B' diminuera d'éclat. C'est pour éviter cette diminution, qu'on limite le diaphragme au point B' sur la ligne ED' menée par les bords des deux verres. Le cône ACB, qui se continue en A'CB', embrasse les points visibles, c'est le *champ* de l'instrument.

Axe optique. — Réticule. — Deux fils d'araignée croisés sont ordinairement tendus sur le diaphragme. On les voit en même temps que A'B', puisqu'ils sont superposés à cette image. Soit P' leur point de croisement: la ligne CP' qui joint ce point au centre de l'objectif est l'*axe optique* de l'instrument.

On sait que les rayons qui passent par le centre optique C ne se dévient pas; par conséquent, la ligne qui joint le réticule P' à C, prolongée jusqu'à l'objet, rencontrera le point P, dont l'image se fait en P'. Il suffira donc d'amener l'image d'un point en P' pour conclure que ce point est dans la direction de l'axe optique, et les déplacements angulaires qu'il faudra donner à l'axe pour voir successivement l'image de plusieurs points en P' seront les angles sous lesquels on voit ces points du lieu de l'observation.

L'axe optique peut être déplacé et réglé à volonté en déplaçant le réticule. D'autre part, toute lunette a un axe géométrique, celui qui passe par les centres de deux collets égaux sur lesquels elle est supportée, c'est aussi celui dont on mesure la direction sur les cercles divisés dont tout instrument d'optique géométrique est pourvu. Il faut faire coïncider ces deux axes. Pour cela on fait tourner la lunette sur ses collets; on voit la croisée des fils parcourir un cercle, dont le rayon diminue et finit par s'annuler quand on déplace l'axe optique jusqu'à le faire coïncider avec l'axe géométrique.

Soit α l'angle sous-tendu par le fil du réticule vu du centre de l'objectif. Tout déplacement de l'axe de la lunette supérieur à cet angle détruira la coïncidence apparente du point visé avec le fil réticulaire. La précision de la visée est donc en raison inverse de cet angle; elle est par conséquent proportionnelle à la longueur de la lunette et inverse de la largeur des fils.

Tirage. — Pour voir distinctement les fils du réticule et le diaphragme, il faut que leur image virtuelle donnée par la loupe soit à la distance de vision distincte, et celle-ci étant variable pour les divers individus doit pouvoir être changée : il y a un tirage qui permet de le faire. En second lieu il faut que l'ensemble de la loupe, du diaphragme et des fils puisse être amené dans le plan focal A'B', qui se déplace et varie avec la distance de l'objet AB; il faut donc un second tirage indépendant du premier, et qui commande à la fois l'oculaire et le diaphragme.

III. — GROSSISSEMENT. — CLARTÉ.

Anneau oculaire. — Tous les rayons que reçoit la lunette peuvent être considérés comme partant de l'objectif, et cet objectif peut être assimilé à un objet lumineux; soit R son rayon. Il donnera derrière l'oculaire une image de rayon r. Cette image sera un cercle plus petit que l'oculaire, une espèce d'anneau limite à travers lequel viennent passer tous les rayons qui ont été envoyés dans la lunette par les points contenus dans le champ de vision. C'est là qu'il faut mettre l'œil pour recevoir le plus de lumière possible : c'est l'*anneau oculaire*.

Le rapport $\frac{R}{r}$ des rayons de l'objectif et de son image est égal au rapport $\frac{p}{p'}$ de leurs distances à l'oculaire; et en désignant par L la longueur CC' du tube, on a, d'après la formule des lentilles,

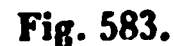
$$\frac{R}{r} = \frac{p}{p'} = \frac{L-f}{f}.$$

Grossissement. — Le grossissement est en général le rapport des dimensions apparentes de l'image et de l'objet.

Pour les lunettes, on prend l'objet à la distance où il se trouve en réalité, et l'image à la distance de la vision distincte. Le diamètre apparent de l'objet est égal à l'angle ACB ou A'CB' (*fig.* 581). Le diamètre apparent de l'image A"B" formée par l'oculaire est égal à l'angle A'C'B', si nous supposons l'œil tout près de l'oculaire, en C'. Le rapport des diamètres apparents de l'image A"B" et de l'objet AB est donc celui des dimensions de l'image A'B', vue successi-

Diaphr
métal n
l'image
le cham
car son
en outr
tilles
du
est
con
n

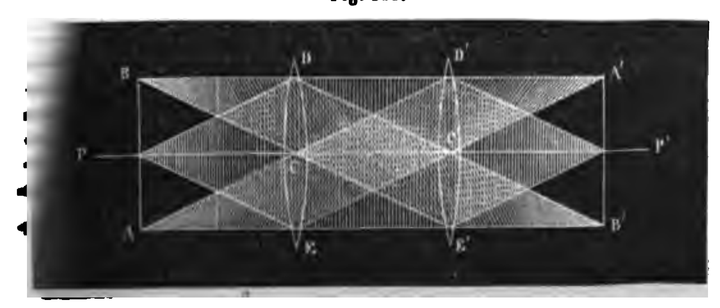
Soit a ... se demander si les objets perdent ou gagnent de l'éclat
.T... ıne lunette. Le calcul montre que, toutes les fois que l'an-
ıs grand que la pupille, l'éclat de l'image est égal à celui
tités totales de lumière que l'objet envoie à l'œil, directe-
tte, sont donc proportionnelles aux surfaces apparentes de
·, elles sont dans le rapport du grossissement superficiel.
ire est plus petit que la pupille, ce qui arrive lorsqu'on fait
t grossissement, l'éclat de l'image diminue, il devient infé-
'objet. En prenant 3 millimètres pour le diamètre de la pu-
que l'anneau oculaire est égal à la pupille pour un objectif
ıvec un grossissement linéaire de 15 fois, pour un objectif de
vec 30 fois, pour un objectif de 1 mètre avec 300 fois. Si la
· 2 millimètres, les mêmes objectifs supportent des grossisse-
› et 500 fois respectivement, sans que l'éclat diminue. Quand
te limite, on voit s'affaiblir l'éclat de tous les objets qui ont une
·nte. Il n'en est pas de même des étoiles. Comme elles ne gros-
dans la lunette, le seul effet de celle-ci est d'agmenter la lumière
· rapport des surfaces de la pupille et de l'objectif. D'autre part,
l du ciel diminue, et, pour une double raison, l'étoile paraît plus
ıséquemment, il faut observer avec des grossissements excessifs
ıt découvrir des étoiles faibles, avec des grossissements modérés
· tudier les détails d'objets étendus qui ne sont pas à l'infini et qui
lairés.



IV. — LUNETTES, TÉLESCOPES, MICROSCOPES.

te terrestre. — Dans les lunettes astronomiques (*fig.* 581) les
·nt vus renversés, ce qui est sans importance pour les astres, mais
a beaucoup d'inconvénients quand on observe sur la terre. Pour
dier, on redresse les images au moyen de deux lentilles égales et

Fig. 583.

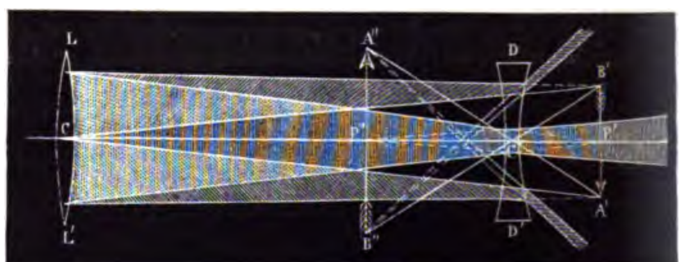


parallèles, DE, D'E' qu'on interpose entre l'objectif et l'oculaire (*fig.* 583).

BA est l'image renversée donnée par l'objectif; elle est au foyer de DE. Les rayons partis de P se transforment en un faisceau parallèle DD'EE' que la deuxième lentille concentre en un foyer P'. Du point B partent des rayons qui deviennent parallèles à l'axe secondaire BC et se concentrent ensuite en un foyer B' sur l'axe B'C' parallèle à BC. On a donc en A'B' une image, égale à AB; mais elle est redressée, c'est celle qu'on observe avec une loupe.

Lunette de Galilée. — L'oculaire de Galilée donne directement les images droites (*fig.* 584); il est formé par une lentille concave DD' placée

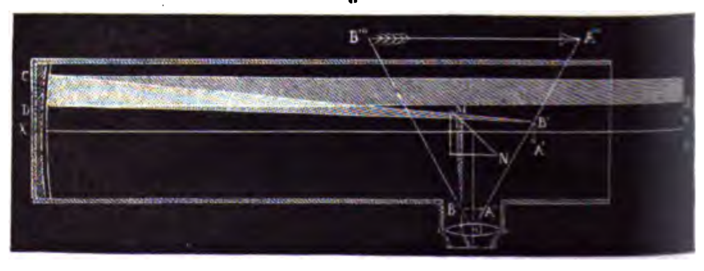
Fig. 584.



avant l'image renversée A'B' que formerait l'objectif LL'. Les rayons dirigés vers P' deviennent divergents dans DD' comme s'ils partaient de P'. Ceux qui aboutissaient en A' divergeront de même, comme s'ils venaient de A'' situé sur l'axe A'C'. Finalement il n'y a point d'image réelle, mais il y en a une en A''B'', qui est virtuelle, redressée et agrandie. En plaçant convenablement DD', elle se forme à la distance de la vision distincte.

Télescopes. — Ce sont des lunettes dans lesquelles on remplace l'objectif

Fig. 585.



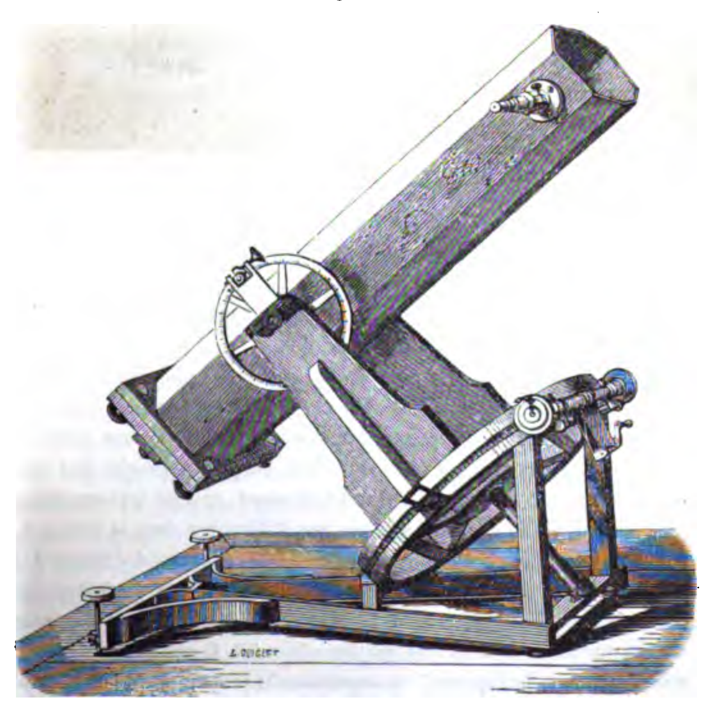
par un grand miroir concave. Soit AB un objet situé au loin, CD le mi-

roir, A'B' l'image renversée. Herschel dirigeait l'appareil de façon que cette image se fît sur le bord du tube au fond duquel était le miroir, et il l'observait directement avec une loupe. Newton plaçait en MN, avant l'image, un petit miroir vertical incliné à 45 degrés sur la direction de l'axe XY, et il obtenait ainsi une image A"B" qu'il examinait avec l'oculaire O fixé sur un tube de tirage horizontal.

L'avantage spécial de ces instruments consiste dans la propriété qu'ont les miroirs de produire des images absolument achromatiques, et comme il est aisé de leur donner de grandes dimensions, on peut leur imposer des grossissements considérables.

Tout récemment, Foucault a perfectionné la construction des télescopes en remplaçant le miroir métallique du télescope de Newton par un miroir

Fig. 586.

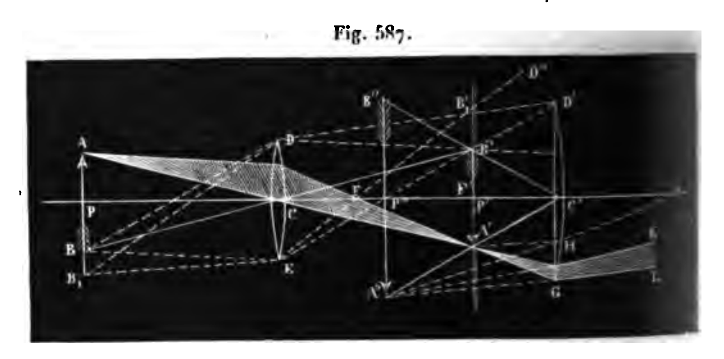


en verre, argenté sur la surface antérieure. L'image est reçue sur un prisme à réflexion totale (*fig.* 585), on l'observe à l'aide d'un microscope. La

fig. 586 représente un télescope monté parallactiquement, c'est-à-dire de manière à pouvoir tourner dans le plan de l'équateur céleste et perpendiculairement à ce plan.

Microscopes. — Les lunettes étant destinées à observer des objets inaccessibles, l'image A'B' (*fig.* 587) se formait en des endroits variables avec les distances de ces objets, et il fallait que la loupe oculaire fût portée par un tuyau de tirage. Le microscope est dans des conditions opposées :

Fig. 587.

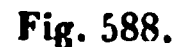


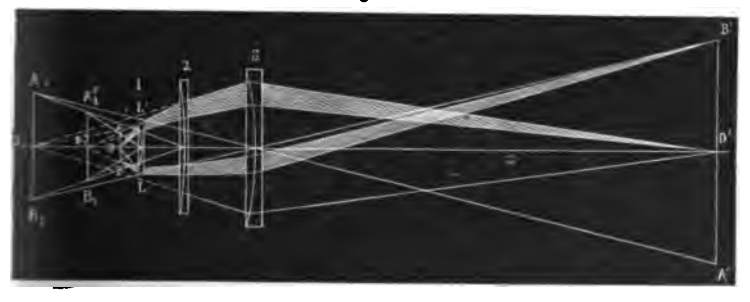
on peut toujours approcher l'instrument des objets qu'on veut étudier et régler sa distance de telle sorte que l'image de AB se fasse en A'B', au plan focal où il faut qu'elle soit pour être vue nettement par l'observateur, quelle que soit sa distance de vision distincte. Il n'y a donc pas besoin de tirage, aussi le microscope est-il un appareil dont les verres sont fixes, mais dont la distance aux objets est variable.

La longueur de l'instrument peut être quelconque ; plus elle sera grande, plus l'image A'B' sera éloignée de AB, et plus le grossissement sera fort. Il n'est pas commode cependant d'augmenter outre mesure cette longueur : on va le comprendre. A mesure que l'objet s'approche de l'objectif DE, l'image A'B' s'éloigne, d'abord lentement, ensuite très-rapidement jusqu'à l'infini, de façon que les moindres différences dans la distance de l'objet AB déterminent des changements de places énormes de l'image A'B' : or, comme les objets qu'on regarde ont toujours une épaisseur, bien qu'elle soit petite, on ne verrait distinctement à la fois que les points situés rigoureusement dans une section plane AB. Il vaut donc mieux réduire la longueur de l'appareil et augmenter la puissance de l'objectif.

Cet objectif est composé de deux ou trois lentilles achromatiques très-petites, superposées et séparées par des distances réglées expérimentalement (*fig.* 588). La première LL' (n° 1) reçoit les rayons de l'objet placé

en AB, diminue leur divergence, forme en D_1 un foyer virtuel de D et en A_1B_1 l'image de AB. La deuxième (n° 2) continue cet effet et forme l'image en $A_2D_2B_2$; la troisième enfin (n° 3) produit une dernière image A'B' qui est réelle, renversée et en face de l'oculaire. Le grossissement de


Fig. 588.



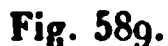
A'B' sera d'autant plus grand que la distance de D à LL' sera plus petite, qu'on aura mis un plus grand nombre de lentilles et qu'elles seront plus fortes. En général, tout microscope est accompagné de plusieurs systèmes d'objectifs numérotés d'après leur degré de puissance. On a représenté (*fig.* 588) la marche de faisceaux limités partant du milieu D et d'un point B de l'objet.

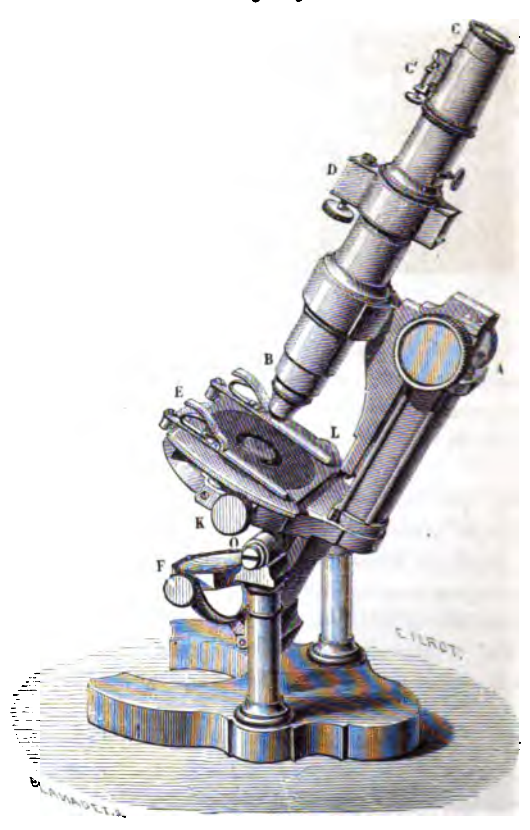
L'angle LDL', que font les rayons extrêmes en arrivant sur la lentille, se nomme l'*angle d'ouverture* de l'instrument. Plus il est grand, plus l'instrument reçoit de lumière de chaque point D. Il est important qu'il en reçoive beaucoup pour que l'image A'B' soit vive; mais pour que les rayons extrêmes DL et DL' fassent leurs foyers au même point que les rayons centraux, il faut que les lentilles soient rigoureusement exemptes d'aberration de sphéricité, condition très-difficile à remplir.

Pour diminuer cette aberration, Amici a imaginé d'immerger la première lentille LL' dans un liquide. On couvre l'objet qu'on veut examiner d'un verre mince; on en approche la lentille LL', et entre ce verre et cette lentille on met une goutte d'eau distillée. De cette façon, le cône des rayons LDL' est très-peu dévié à travers la première lentille, le premier foyer D_1 est tout près de D, l'aberration est très-faible et le microscope supporte un angle d'ouverture considérable.

La forme et la disposition des microscopes varient beaucoup; nous représentons (*fig.* 589) l'un des plus parfaits, celui de M. Nachet. Le corps de l'instrument est en BC; il se meut de haut en bas dans une coulisse qu'on fait marcher par une crémaillère et un pignon A. Le porte-objet est

en E ; il est fixe. Comme il arrive souvent que pendant les observations l'objectif B rencontre le porte-objet et le brise, on l'a fixé à l'extrémité d'un tube rentrant, à ressort ; par ce moyen il remonte dans le corps du microscope, quand on vient par mégarde à trop l'abaisser.


Fig. 589.



Le pignon A donne à l'appareil un mouvement rapide ; pour achever la mise au point, une vis D, à pas très-serré, fait marcher l'oculaire très lentement, jusqu'à ce qu'on voie distinctement l'image. L'appareil entier peut tourner autour de l'axe horizontal O. Les objets sont placés sur la plate-forme E entre deux verres que maintiennent par une légère pression deux règles à ressort. Les vis K et L transportent lentement la plate-forme

dans deux sens rectangulaires, afin d'amener l'objet dans le champ de l'oculaire.

L'éclairement de cet objet est l'une des conditions essentielles du microscope. On l'obtent par un miroir concave F, qui est mobile dans tous les sens, sur lequel on reçoit la lumière des nuées ou d'une lampe ou d'un verre dépoli fortement illuminé, et qui la concentre, suivant l'axe de l'instrument, sur les objets qu'on veut observer. Comme ceux-ci sont toujours très-minces, ils sont presque transparents, et chaque détail de leur organisation intérieure transmet cette lumière comme s'il était lumineux lui-même. Au-dessous du porte-objet se trouve un diaphragme qui permet de faire varier la quantité de lumière. Souvent on la concentre par des systèmes de lentilles.

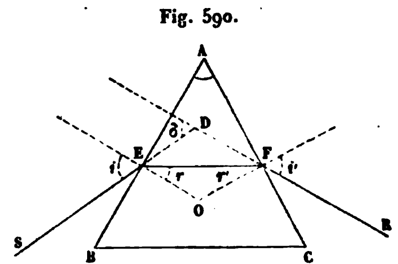
CHAPITRE V.

LE SPECTRE.

I. — THÉORIE DU PRISME.

Cherchons quelle sera, dans l'intérieur d'un prisme, la marche d'un rayon lumineux dont l'indice est n. Soient SEFR la route suivie (*fig.* 590), EO et FO les normales à l'incidence et à l'émergence, i, i', r, r' les angles que les rayons font avec ces normales, et désignons par A l'angle du prisme. Nous aurons d'abord

Fig. 590.



(1) $\sin i = n \sin r$,

(2) $\sin i' = n \sin r'$.

Les normales en E et F se rencontrent en O. Dans le quadrilatère AEOF, l'angle O est supplémentaire de A; dans le triangle EOF, le même angle O est encore supplémentaire de $r + r'$. Donc

$$r + r' = \text{A}. \tag{3}$$

Les rayons incident et émergent prolongés forment, à leur point de rencontre D, un angle δ qu'on nomme *angle de déviation*, et le triangle DEF donne

$$\delta = \text{DEF} + \text{DFE} = i - r + i' - r',$$

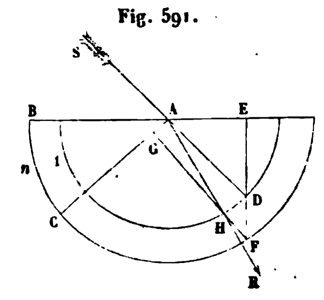
$$i + i' = \text{A} + \delta. \tag{4}$$

Nous avons ainsi quatre relations entre les sept quantités i, i', r, r', n, A et δ; il suffira d'en connaître trois pour calculer les autres.

On peut trouver la marche des rayons dans un prisme par une construction géométrique très-simple. Du point A, sommet du prisme ABC, on décrira deux circonférences avec les rayons 1 et n; le rayon incident SA rencontre la pre-

mière en D; par le point D on abaisse la normale DE sur la face d'incidence AB. Cette normale rencontre la seconde circonférence en F; par le point F on abaisse la normale FG sur la face d'émergence AC; cette normale coupe la première circonférence en H, et AH sera la direction du rayon émergent. En effet, nous savons que AF est le rayon réfracté par la surface AB; en considérant AF comme le rayon incident par rapport à la face AC, on trouvera que AH est le rayon réfracté par AC, c'est-à-dire le rayon émergent.

Fig. 591.



Minimum de déviation. — Si au lieu d'être égal à i, l'angle d'incidence devenait i', les formules montrent que l'angle d'émergence serait i au lieu de i' et que la valeur de δ ne changerait pas. Si donc on suppose fixe le rayon SE, et qu'on fasse tourner le prisme pour passer de l'incidence i à i', la déviation ira d'abord en diminuant ou en augmentant jusqu'à un minimum ou à un maximum pour reprendre la même valeur.

L'expérience prouve, en effet, qu'elle atteint un minimum, et il a lieu pour le cas particulier où les deux positions qui donnent une déviation égale se confondent en une seule, c'est-à-dire quand $i = i'$; dans ce cas $r = r'$, et l'on a

$$(4) \qquad 2i = A + \delta,$$

$$(3) \qquad 2r = A,$$

$$(1) \qquad \sin\frac{A+\delta}{2} = n\sin\frac{A}{2}.$$

Il sera toujours facile de placer le prisme dans cette position, de mesurer A et δ et de calculer l'indice n.

Foyer virtuel du prisme. — Nous avons montré précédemment que les rayons qui viennent du point S (*fig.* 592) forment, après une première réfraction à travers un milieu ABC, une image S'. Celle-ci peut maintenant être considérée comme un centre de rayonnement; les rayons S'BC se réfractent de nouveau en C et forment l'image J. Il y a donc derrière le prisme un foyer virtuel du point S. Le calcul montre que sa position varie, et que, pour le cas du minimum de déviation, *la distance de ce foyer au prisme est égale à* SB, *celle du point lumineux*.

Ceci conduit à trois conséquences importantes :

1° Si S est une fente lumineuse parallèle aux arêtes du prisme, et que

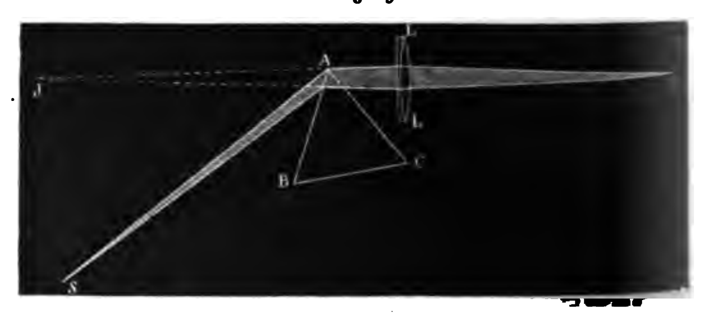
nous placions l'œil dans le trajet des rayons CD, nous verrons en J l'image nette de la fente, à la même distance que S, si la déviation est minima;

Fig. 592.

2° Au lieu de regarder l'image J à l'œil nu, nous pourrons l'observer avec une lunette pour la voir plus distinctement;

3° Enfin nous pourrons fixer derrière le prisme une lentille convergente LL (*fig*. 593); celle-ci, recevant les rayons comme s'ils venaient de

Fig. 593.

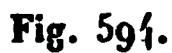


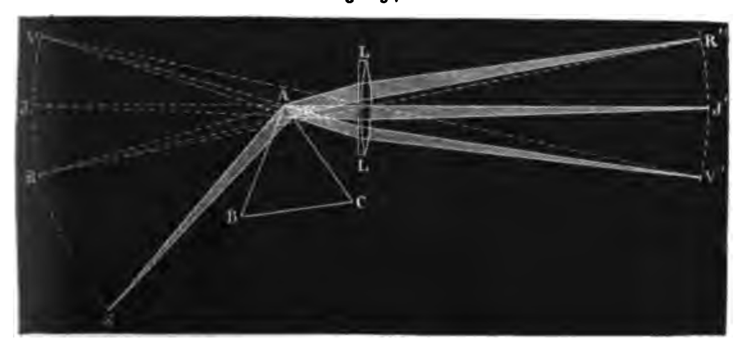
J, les fera converger en un foyer réel J', et quand on placera un écran en ce point, on y devra voir une image réelle et renversée de la fente.

Pour vérifier ces conséquences, il faut prendre une lampe alimentée par l'alcool salé, ou mieux la flamme du chalumeau de Drummond qui a léché un morceau de sel marin fondu. Ces lumières sont jaunes, et en regardant la fente à travers le prisme, on voit en J une image déviée de S, image que l'on peut projeter sur un écran en J' (*fig*. 593) au moyen d'une lentille LL.

On conçoit maintenant que s'il existait une lumière moins réfrangible que celle qui vient d'être examinée, elle ferait un foyer R moins dévié

que J (*fig.* 594), qu'une lumière plus réfrangible en ferait un autre en V, et que si les rayons incidents contenaient un mélange de rayons


Fig. 594.

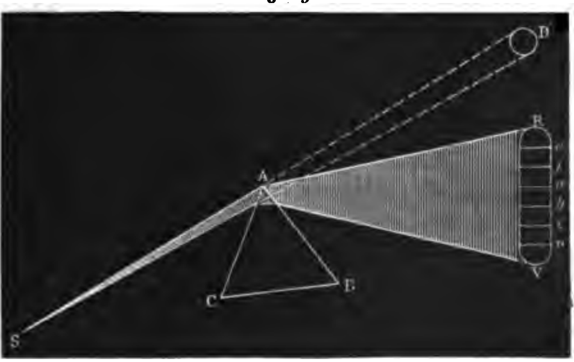


dont les indices fussent différents, ils se sépareraient, par l'effet du prisme, en une série d'images étalées depuis R jusqu'à V. Or c'est précisément ce que Newton a observé en étudiant la lumière solaire.

II. — SPECTRE LUMINEUX.

Newton fit pénétrer dans une chambre obscure un faisceau solaire horizontal par une ouverture circulaire très-petite S. Ce faisceau formait un

Fig. 595.



cône de rayons d'un angle égal à 32' et dessinait sur l'écran opposé au volet une image blanche et circulaire du soleil, en D (*fig.* 595). On le re-

çut sur un prisme ABC dont les arêtes étaient verticales; il fut dévié en RV, et l'on vit sur l'écran une image allongée colorée d'une infinité de teintes de R en V. Cette image est le *spectre solaire*. Elle offre d'abord en R un rouge sombre qui s'éclaire peu à peu en même temps que sa couleur passe insensiblement à une teinte orangée. A son tour, et par une dégradation continue, cet orangé se transforme en jaune, le jaune en vert, le vert en bleu, après quoi viennent l'indigo et le violet. Le spectre nous montre ainsi une succession de couleurs distinctes en nombre infini; mais comme on ne peut les nommer toutes, on les a rapportées aux sept types principaux dont les noms suivent, et qui sont rangés par ordre de déviation croissante : *rouge*, *orangé*, *jaune*, *vert*, *bleu*, *indigo*, *violet*.

Newton n'a point hésité à expliquer ces apparences en admettant que la lumière blanche se compose d'une infinité de rayons simples dont les indices de réfraction varient d'une manière continue de R en V et qui se séparent par la réfraction.

Pour justifier cette hypothèse, il fallait démontrer : 1° qu'en réalité ces diverses couleurs sont inégalement réfrangibles; 2° qu'en les réunissant après les avoir séparées, on reconstitue la lumière blanche.

I. Inégale réfrangibilité des couleurs. — On produit un spectre RJV avec un premier prisme ABC, et l'on fait une image réelle de ce spectre

Fig. 596.



en R'J'V' au moyen d'une lentille LL. On fait passer à travers une fente l'une des couleurs de R'V', par exemple le jaune J'; on la reçoit sur un second prisme placé au centre d'un cercle divisé, et l'on observe l'image réfractée avec une lunette HJ" (*fig.* 596). Cette fois, il n'y a plus de

spectre, la lumière n'est plus étalée, et l'image de la fente J est nette, comme avec la flamme de l'alcool salé. On cherche le minimum de déviation, on mesure δ et on calcule l'indice de réfraction n.

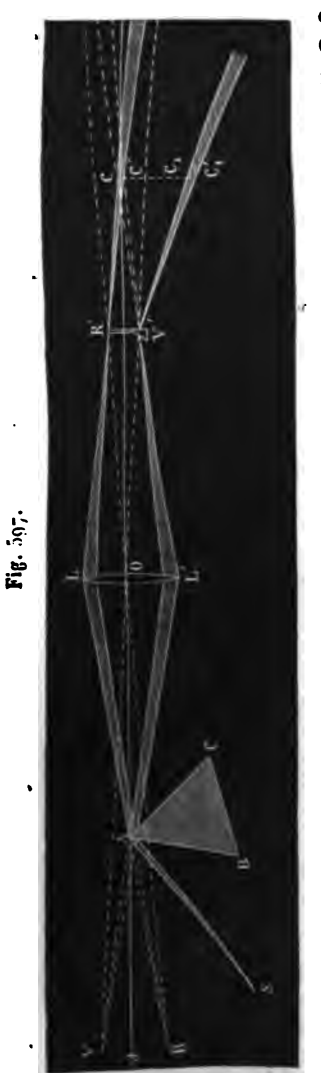


Fig. 597.

En répétant la même expérience avec les diverses couleurs, on trouve qu'elles sont toutes indécomposables, et que leur indice n augmente du rouge au violet.

II. **Recomposition des teintes.** — Pour superposer les diverses couleurs, on peut employer divers moyens. Ayant préparé un spectre réel R'V' (*fig.* 597) au moyen de la lentille LL', on voit que les rayons, en continuant leur route, viennent tous en CC', où se trouve l'image du point A, image qui est commune à tous les rayons, dans laquelle ils se superposent, et où se forme de la lumière blanche.

Newton reçut ensuite le spectre sur un miroir tournant, et en regardant dans ce miroir dans une direction fixe, il voyait à chaque révolution et successivement toutes les couleurs simples. Quand le miroir tournait très-vite, les impressions de chaque couleur paraissaient continues, et leur superposition reproduisait du blanc. Il prit ensuite des poudres colorées qui avaient les teintes des couleurs simples; il les mêla en proportions convenables, et il réussit à faire du gris, ce qui n'est qu'un blanc peu éclairé.

Mélange des couleurs. — Si, à l'aide d'un petit prisme V', on enlève une ou plusieurs couleurs du spectre R'V' pour les dévier vers $C_1C'_1$, il n'arrive en CC' que ce qui reste du spectre total, et l'on obtient deux images CC' et $C_1C'_1$, dont les teintes se partagent les éléments de la lumière blanche. Ces teintes sont dites *complémentaires;* leur réunion reproduit du blanc. En

retranchant du spectre la lumière rouge, on obtient un vert composé; en retranchant le vert simple, on obtient un rouge. On trouve ainsi qu'il y a trois groupes de teintes complémentaires :

Rouge.	Orangé.	Jaune.
Vert.	Bleu.	Violet.

Les teintes mixtes qui reproduisent les couleurs simples s'en distinguent aisément en ce qu'elles sont décomposables par le prisme.

La théorie de Newton nous permet d'expliquer la coloration des objets. La couleur résulte de la diffusion des rayons qui éclairent un corps; il en absorbe quelques-uns, il en réfléchit d'autres, dont le mélange produit une teinte déterminée. Une étoffe nous paraît rouge, quand elle réfléchit, en proportion prépondérante, la lumière rouge. Les corps qui réfléchissent tous les rayons solaires nous paraissent blancs; ceux qui les absorbent tous sont noirs. Il est évident que la couleur d'un corps varie avec la lumière qui l'éclaire; elle n'est pas la même au jour et à la lumière du gaz; avec une lumière monochromatique, elle a nécessairement la teinte de cette lumière.

III. — RAIES DU SPECTRE.

Nous avons vu que chaque faisceau d'une même réfrangibilité fait son foyer en un point donné : le rouge en R, le jaune en J, le violet en V. S'il y a dans la lumière blanche un nombre infini de couleurs dont la réfrangibilité croisse d'une manière continue de R en V, le spectre sera continu; s'il n'y en avait qu'un nombre fini et que leurs indices variassent d'une manière discontinue, il y aurait dans les spectres des lacunes obscures, des raies noires parallèles aux arêtes du prisme. Il y en a, en effet; Wollaston en reconnut sept ou huit en regardant directement à l'œil nu le spectre virtuel.

Il ne comprit pas l'importance de cette découverte, qui tomba dans l'oubli. Quinze ans plus tard, Frauenhofer retrouva ces mêmes raies, qu'il étudia à l'aide d'une lunette. Il en compta plus de six cents; depuis, on en a dessiné quelques milliers. Elles ne sont pas égales en largeur ni placées à des distances régulières : elles se pressent en certains endroits pour s'écarter en d'autres sans aucun ordre apparent. En étudiant les groupes principaux, Frauenhofer reconnut qu'ils sont toujours composés des mêmes raies élémentaires, se suivant dans le même ordre et occupant les mêmes places dans la série des couleurs. On les retrouve avec tous les prismes

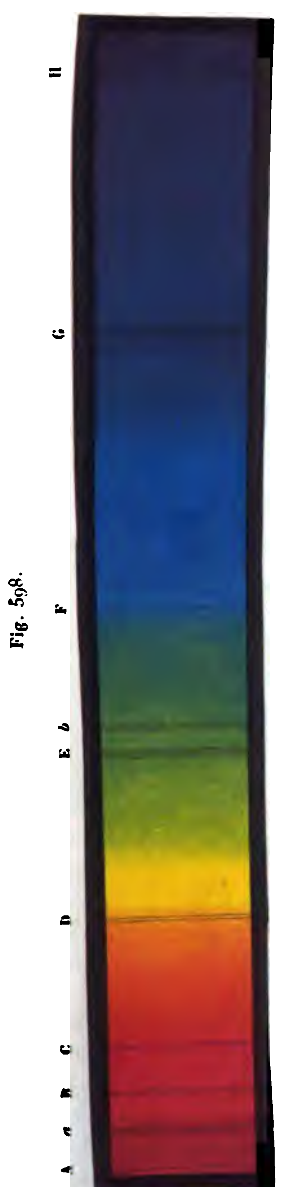


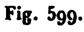
Fig. 598.

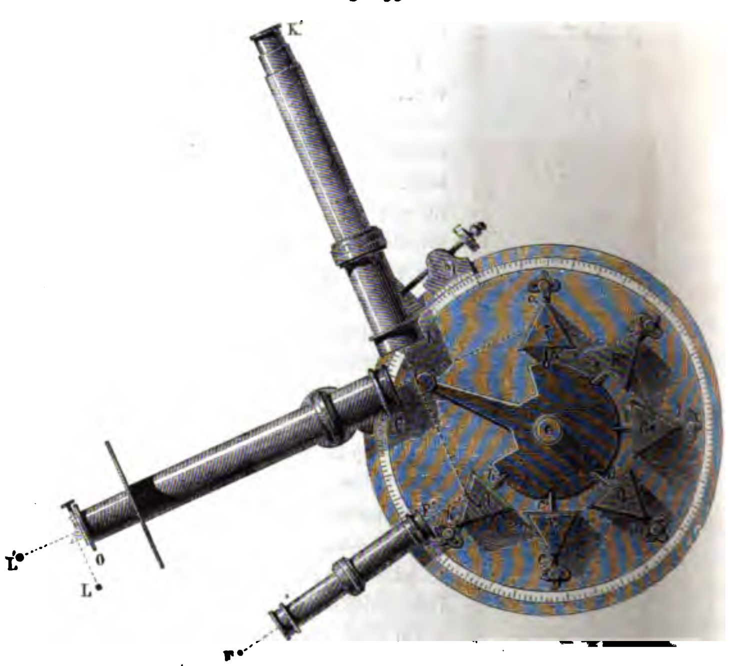
et dans toutes les lumières qui viennent du soleil, soit directement, soit après avoir été diffusées par les nuages ou les planètes. Les résultats changent avec des rayons provenant de sources différentes.

Étant constantes, les raies deviennent des repères excellents pour caractériser les diverses portions du spectre solaire, et on peut nommer les principales (*fig.* 598). Frauenhofer désigna les groupes qu'on voit à l'œil nu par les lettres de l'alphabet. Les trois premiers, A, B, C, sont dans le rouge : A à l'extrémité sombre, C près de l'orangé. D occupe la partie la plus brillante du spectre, entre l'orangé et le jaune ; c'est une des raies les plus nettes ; c'est la plus précieuse à cause de sa situation moyenne. Le jaune en contient trois qui sont très-vives ; la dernière est désignée par E. Le vert en renferme trois autres, presque équidistantes, dont la moyenne est représentée par F. G se voit entre le bleu et l'indigo. H est très-large et termine le violet ; on ne la voit que dans l'obscurité complète.

On peut projeter ces raies sur un écran avec une lentille LL (*fig.* 594), mais il est clair qu'on ne peut les voir toutes. Deux lumières de réfrangibilité très-peu différente donnent, en effet, des images de la fente qui sont très-rapprochées, et si leur séparation est moindre que leur largeur, elles empiètent l'une sur l'autre. Mais en employant plusieurs prismes en succession, on augmente à chaque fois la séparation des images, et l'on multiplie les raies visibles comme on sépare les étoiles doubles, en augmentant le grossissement des lunettes. La *fig.* 599 représente un *spectroscope* à six prismes, tel qu'il a été employé par M. Kirchhoff dans ses recherches sur le spectre solaire. La lu-

mière arrive de L' par un collimateur OC, traverse les prismes A, B,..., qui reposent sur une plate-forme horizontale et qui sont tous amenés au


Fig. 599.



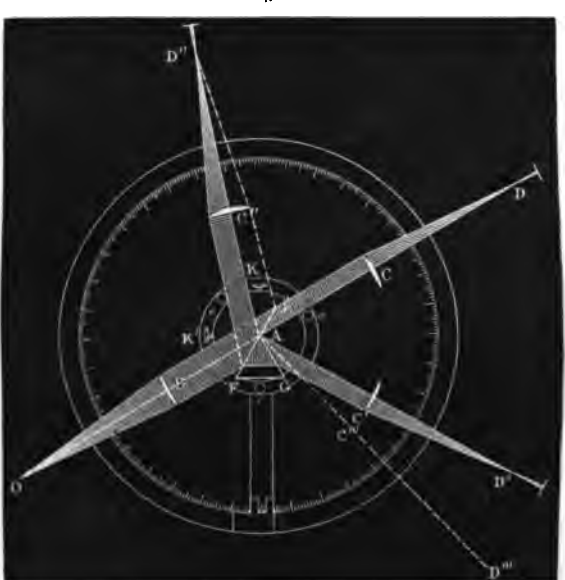
minimum de déviation; elle sort en H et pénètre enfin dans la lunette KK'. La moitié supérieure de la fente O est cachée par un prisme à réflexion totale, qui renvoie dans le tube OC la lumière d'un point L, placé latéralement, dont on peut ainsi comparer le spectre à celui de la lumière L'. Pour rapporter les mesures à des repères fixes, un second tube FF' porte un micromètre tracé sur verre, qui se réfléchit sur la face H dans la direction HK.

Quand on étudie ainsi la raie D, par exemple, on trouve qu'elle n'est pas simple, mais composée de trois autres, deux extrêmes à peu près égales et fortes, et une troisième intermédiaire moins apparente. Frauenhofer n'a point expliqué les raies. La découverte des causes d'un phénomène aussi complexe était réservée à M. Kirchhoff, comme nous le montrerons plus loin.

IV. — MESURE DES INDICES.

Chaque raie du spectre répond à un indice de réfraction particulier que l'on peut mesurer par la méthode de la déviation minima au moyen d'un cercle divisé portant un collimateur OB et une lunette mobile CD. Le prisme AFG (*fig.* 600) est placé sur une plate-forme KK', de manière que

Fig. 600.



l'arête A se trouve au centre, c'est-à-dire en contact avec le fil vertical du réticule de la lunette CD dans toutes les positions de cette dernière. Il faut, en outre, que l'arête soit normale au plan du cercle divisé, ce qui a lieu lorsque l'image de la fente O du tube OB, réfléchie d'abord par la face AF, puis par AG, qu'on amène en AG', coïncide avec un fil de la lunette, fixée dans une position quelconque C"D". On mesure alors l'angle GAG' dont on a fait tourner le prisme, on le retranche de 180 degrés, et l'on a l'angle A du prisme.

On éclaire ensuite la fente O par les rayons solaires; à la sortie du collimateur, ils prennent une direction commune BA. Il se forme un spectre, et l'on cherche la position qu'il faut donner au prisme et à la lunette pour que la déviation de ce spectre soit minima. Cette condition

est réalisée si l'image d'une raie se déplace toujours dans le même sens, lorsque l'on fait tourner le prisme à droite ou à gauche. On mesure alors

Fig. 601.

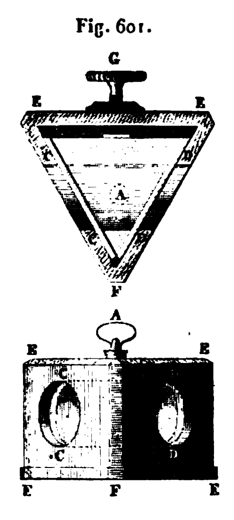
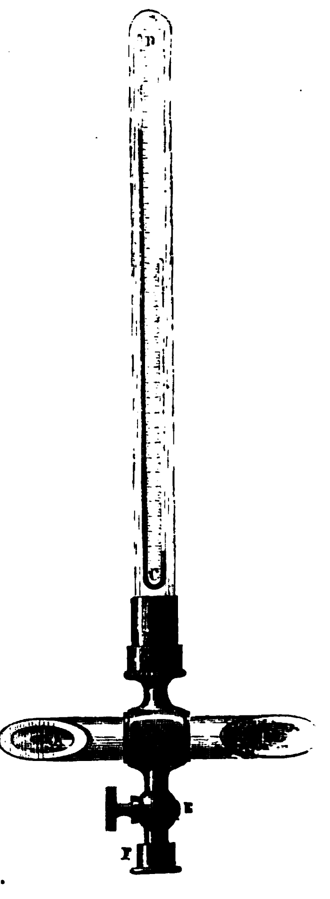


Fig. 602.



cette déviation δ, c'est-à-dire l'angle DAD', et l'on calcule n par la formule

$$n \sin \frac{A}{2} = \sin \frac{A + \delta}{2}.$$

On trouve ainsi l'indice de chaque raie pour la matière dont le prisme est fait.

Pour opérer sur les liquides, on les enferme dans des prismes de verre creux (*fig.* 601) fermés par des glaces CC, DD que l'on serre par une enveloppe métallique EFE au moyen d'une vis G. Pour les gaz, Biot et Arago employaient un prisme de verre AB (*fig.* 602) formé par un tube ép... sur lequel étaient collées deux glaces inclinées sous un angle d'envir... 145 degrés. Un baromètre CD, couvert d'une cloche, mesurait la pression du gaz à l'intérieur. L'appareil pouvait se fixer en F sur une machine pneumatique qui permettait de vider la cloche et de laisser rentrer ensuite les gaz. Faisant d'abord le vide dans AB, on déterminait l'in-

dice n pour le passage du vide dans l'air à la pression de 760 millimètres ou l'*indice de réfraction absolu* de l'air. Le prisme ayant été ensuite rempli avec un gaz quelconque, on observait l'indice relatif $\frac{n'}{n}$ pour le passage de l'air dans ce gaz, et l'on en déduisait n'.

La dispersion des gaz est si faible que les couleurs du spectre se séparent à peine par la réfraction; on peut donc, en général, se contenter de connaître l'indice moyen.

Voici d'abord un tableau des *indices moyens* de quelques corps; ils correspondent à la lumière jaune.

Indices de réfraction.

Chromate de plomb..	2,50 à 2,97	Baume du Canada	1,53
Diamant	2,47 à 2,75	Huile de noix	1,50
Phosphore	2,224	Huile d'olive	1,47
Soufre natif	2,115	Spath fluor	1,43
Zircon	1,95	Acide sulfurique	1,42
Borate de plomb	1,86	Alcool rectifié	1,37
Rubis	1,78	Éther sulfurique	1,36
Sulfure de carbone	1,67	Albumine	1,35
Huile de cassia	1,63	Eau	1,33
Topaze	1,61	Air	1,000294
Béryl	1,60	Oxygène	1,000272
Huile d'amandes amères	1,60	Hydrogène	1,000138
Émeraude	1,58	Azote	1,000300
Quartz	1,54	Chlore	1,000772
Sel gemme	1,54	Sulfure de carbone	1,000150
Colophane	1,54	Vapeur de mercure	1,000556

Voici enfin les indices de réfraction des principales raies de Frauenhofer, pour l'eau et pour deux espèces de verre. Leurs différences mesurent la *dispersion* ou le *pouvoir dispersif* de ces corps.

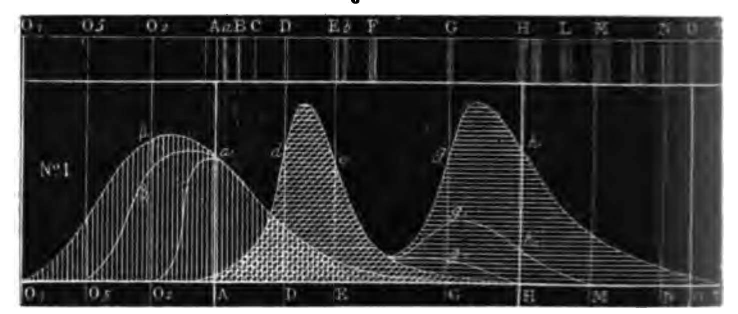
	B	C	D	E	F	G	H
Eau	1,3309	1,3317	1,3336	1,3358	1,3378	1,3413	1,3442
Flint	1,6919	1,6935	1,6980	1,7035	1,7089	1,7187	1,7275
Crown	1,5258	1,5268	1,5296	1,5330	1,5360	1,5417	1,5466

V. — SPECTRE CALORIFIQUE.

Le spectre lumineux n'a pas le même éclat en ses diverses parties; à peine visible vers la raie A, il est de plus en plus éclairant jusqu'au

jaune, puis il s'affaiblit jusqu'au violet extrême. Frauenhofer a figuré ces intensités par une courbe A*de*H (*fig.* 603); nous avons représenté par des traits inclinés à 45 degrés la surface limitée par cette courbe.

Fig. 603.



Mais le soleil n'émet pas seulement de la lumière, il rayonne aussi de la chaleur; il faut savoir si celle-ci est aussi décomposable en rayons simples, si elle diffère ou non de la lumière : pour cela il faut étudier les propriétés calorifiques du spectre, ce que fit W. Herschel.

En promenant un thermomètre dans le spectre, il trouva partout une augmentation de température; elle croissait du violet au rouge; il con... de cette expérience : 1° que la chaleur s'étale en un spectre; 2° qu'elle se sépare en rayons simples, dont la réfrangibilité croît du rouge au vi... 3° que ces rayons diffèrent entre eux par la même différence physique ... les diverses couleurs, et qu'on peut les nommer chaleurs *bleue, jaune*, *rouge*, etc., pour exprimer qu'elles ont les réfrangibilités de ces coul...

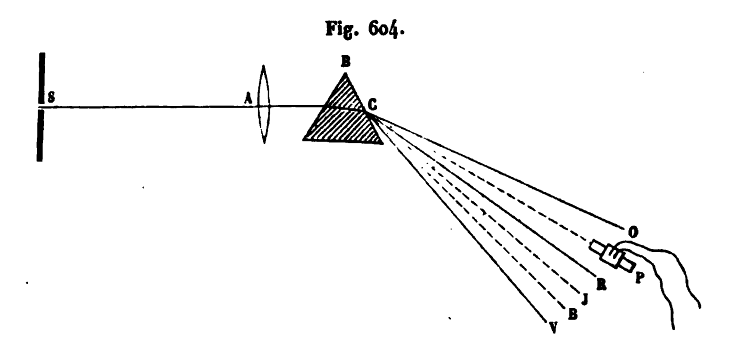
Il fit une découverte plus importante, c'est que l'effet calorifique n... s'arrête pas à la limite du rouge; elle se continue dans la partie obs... de sorte qu'il existe des chaleurs moins réfrangibles que le rouge, qui ... sont points sensibles à l'œil, mais qui le sont au thermomètre : il ... nomma *chaleurs obscures*.

L'expérience d'Herschel était incomplète : il se servait de prismes ... verre, et l'on verra bientôt que cette substance intercepte la plus gran... partie des chaleurs obscures. Melloni, qui la recommença longtemps apr... prit un prisme de sel gemme, concentra les rayons par une lentille ... même matière, qui laisse passer tous les rayons connus. Alors le spect... calorifique lui parut bien plus étendu (*fig.* 604).

La chaleur était à peine sensible jusqu'au bleu, elle augmentait peu ... peu jusqu'au rouge obscur; à partir de ce point, elle prenait une inte...

sité énorme, atteignait un maximum (*fig.* 603) et ne cessait d'être constatée qu'à une distance du rouge double de celle qui sépare le rouge du

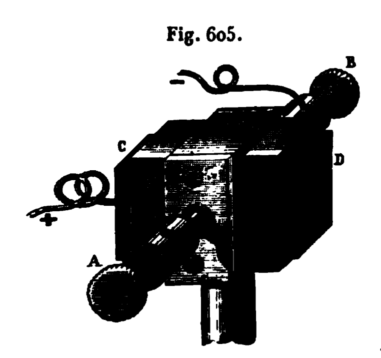
Fig. 604.



violet extrême. Le spectre des chaleurs obscures est donc deux fois égal à celui des lumières, et ces chaleurs diffèrent entre elles par leur refrangibilité, ou, comme le dit Melloni, par leur *thermochrose*, c'est-à-dire par leur couleur calorifique. Nous les diviserons en sept groupes : $O_1, O_2, \ldots, O_7$, comme le spectre lumineux, et nous les représenterons par la courbe $O_7 \beta \alpha G$ que limitent des traits verticaux.

Pile de Melloni. — Pour faire ces expériences, Melloni ne prit point un thermomètre; il utilisa la pile thermo-électrique de Nobili. Cette pile très-petite (*fig.* 605) a été décrite page 312; elle est composée de petits barreaux de bismuth et d'antimoine, offre ses soudures impaires d'un côté, ses soudures paires de l'autre, de sorte que le flux de chaleur qui arrive sur une des faces développe un courant électrique qui est transmis à travers un galvanomètre et dévie l'aiguille. On pourra mesurer l'intensité de la chaleur par cette déviation, si l'on a d'avance gradué l'instrument.

Fig. 605.



Graduation de la pile. — Pour faire cette graduation, Melloni, reçut sur une face le rayonnement d'une première lampe. Admettons qu'il produise une déviation de 10 degrés et que son intensité soit a. Il fit agir sur

l'autre face une seconde lampe. Soient x l'intensité inconnue de son rayon-nement si elle était seule, $x - a$ son intensité différentielle quand les deux sources agissent à la fois. Supposons qu'on ait placé la deuxième à une distance telle que la déviation différentielle soit de 10 degrés, $x - a$ sera égal à l'intensité a qui correspond à 10 degrés. Donc

$$x - a = a, \quad x = 2a;$$

or on trouve que la deuxième lampe agissant seule avec cette intensité double $2a$, produit une déviation double, ou 20 degrés. En résumé les déviations sont proportionnelles aux intensités des flux calorifiques et peuvent les mesurer. Cette proportionnalité cesse d'être rigoureuse au d… de 30 degrés.

VI. — SPECTRE CHIMIQUE.

S'il y a des radiations invisibles en deçà du rouge, il est probable q… en existe aussi au delà du violet. En effet, Scheele découvrit, en 17… que le chlorure d'argent noircit dans le spectre, et particulièrement d… le violet extrême. Wollaston constata que cette propriété se continue b… au delà du violet, jusqu'à une distance au moins égale à l'étendue … spectre ordinaire, ce qui prouvait l'existence de radiations très-réfrangibles. Continuant ces études en 1842, M. Edm. Becquerel prépara … spectre réel très-pur avec un prisme et une lentille de flint. On y voy… toutes les raies de A en H. Il le reçut sur une plaque daguerrienne ou … une feuille de papier sensible, et développa l'image par les procédés ordinaires de la photographie. Elle s'étendait très-loin au delà de la partie visible; on y découvrit non-seulement les raies du spectre lumineux, … un très-grand nombre d'autres qui les suivaient au delà du violet extrê…

M. Becquerel a continué la nomenclature de Frauenhofer et désign… groupes principaux par les lettres L, M, N, O, P, Q, R, S, T. Plus ré…ment, M. Mascart en a photographié plus de sept cents.

Il y a donc des radiations ultra-violettes, douées d'une remarquable activité chimique, et nommées pour cette cause *rayons chimiques*. Hersch… montré qu'on peut les voir à l'aide de certaines précautions, et q… offrent une teinte gris-lavande. Ils sont discontinus; ils diffèrent par … réfrangibilité, comme les couleurs et les chaleurs obscures; en ch… lieu du spectre ils sont simples; ils atteignent leur maximum d'inten… au delà du violet, et ne s'éteignent qu'à trois fois au moins l'étendue … spectre visible.

Actinomètre. — Pour mesurer l'intensité de ces radiations, M. Becquerel prend deux lames identiques d'argent poli; il expose une de leurs faces à la vapeur d'iode jusqu'à produire une teinte violette, puis il les plonge toutes deux parallèlement dans une auge de verre pleine d'un liquide peu conducteur, en tournant la face iodée en dehors, et il les réunit par un galvanomètre de trois mille tours au moins. Si alors on éclaire l'une de ces plaques par le soleil, il se forme un courant très-intense; et, même avec une bougie, la déviation atteint 15 ou 20 degrés. Elle indique que la plaque est négative et le liquide positif.

Elle a permis de comparer les divers rayons du spectre, depuis A jusqu'à T (*fig.* 603). Il suffisait de les faire passer successivement à travers une fente, de les recevoir sur l'actinomètre et de mesurer l'intensité du courant. On a construit ensuite la courbe de ces intensités, qui est figurée par des traits horizontaux (*fig.* 603).

Depuis A jusqu'à G, c'est-à-dire dans l'étendue du spectre visible, elle se confond à peu près avec celle de Frauenhofer; mais, à partir de F, l'action chimique s'avive, et la courbe suit la ligne *gh*T, prenant un maximum vers H et s'éteignant peu à peu à la limite des rayons chimiques.

On voit, en résumé, que le soleil émet trois sortes de radiations : les chaleurs obscures, les couleurs visibles et les rayons ultra-violets. Elles sont superposées dans le flux solaire; mais elles se séparent par le prisme et se rangent dans le spectre par ordre de refrangibilité. On les reconnaît aux effets qu'elles déterminent et qui sont au nombre de trois : l'effet calorifique, l'effet lumineux, l'effet chimique, les trois effets sont superposés au milieu du spectre; un seul persiste aux extrémités.

On admet aujourd'hui que dans un lieu du spectre moyen, dans le vert par exemple, il n'y a qu'une seule espèce de rayon, constitué par des vibrations de l'éther et caractérisé par une certaine durée de vibration. Vient-elle à tomber dans l'œil, elle y produit une action d'où résulte la vue des objets : elle constitue la lumière; si elle rencontre un thermomètre, elle l'échauffe : c'est la chaleur; enfin elle peut développer des actions chimiques. Mais cette lumière, cette chaleur, cette force chimique sont des effets distincts d'une même cause, qui est la vibration. C'est dans ce sens qu'il faut comprendre comment la chaleur et la lumière sont identiques, et c'est ce qui résultera de tous les phénomènes qui vont suivre.

CHAPITRE VI.

TRANSMISSION. — RÉFLEXION. — DIFFUSION.

I. — TRANSMISSION DES RAYONS SIMPLES.

Formule théorique. — Quand une radiation simple d'intensité I traverse une substance quelconque d'épaisseur égale à e millimètres, elle s'affaiblit et se réduit à I'. On peut trouver théoriquement le rapport de I' à I; en effet, négligeons la perte produite par la réflexion et décomposons la lame en tranches successives d'épaisseur égale à 1 millimètre, le rayon I en traversant la première deviendra $I\alpha$; ce faisceau $I\alpha$ éprouvera proportionnellement les mêmes effets dans la seconde et se réduira $(I\alpha)\alpha$ ou à $I\alpha^2$. Une épaisseur égale à 3 millimètres transmettra de même $I\alpha^3$, et en général l'intensité I' du rayon qui aura traversé l'épaisseur e sera

$$(1) \qquad I' = I\alpha^e.$$

α se nomme le *coefficient de transmission;* il est variable avec la nature des substances et l'espèce des radiations.

Cette loi, évidente en elle-même, a été vérifiée pour les rayons de lumière simple, au moyen de photomètres que nous décrirons dans la suite; elle l'a été par Masson et moi, pour la chaleur, au moyen de la pile de Melloni; enfin par M. Ed. Becquerel, avec le secours de son actinomètre, pour les radiations chimiques. Il ne reste plus qu'à chercher pour les divers rayons les valeurs du coefficient de transmission.

I. **Transmission de la lumière.** — L'œil est insensible aux rayons infra-rouges et ultra-violets; étudions d'abord, au moyen de cet organe, l'effet des divers milieux sur le groupe des rayons moyens depuis A jusqu'à H (*fig.* 603).

1° Les substances qui transmettent en totalité tous les rayons lumineux du spectre, depuis le rouge jusqu'au violet, sont dites *transparentes*. À vrai dire, il n'y en a pas qui réalisent absolument ces conditions, quand leur épaisseur est considérable. Cependant l'eau, le verre, etc., y satis-

font sensiblement. Dans ce cas, le coefficient α est égal à l'unité pour tous les rayons.

2° Pour un grand nombre de corps, α diminue depuis le rouge jusqu'au violet. Ces corps éteignent la lumière d'autant plus qu'elle est plus réfrangible. L'épaisseur augmentant, ils finissent par ne plus transmettre que le rouge. C'est le cas du verre coloré par le protoxyde de cuivre; c'est aussi le cas des liqueurs, du vin, même de l'eau pure et de l'air qui colorent le soleil en rouge par transparence, tandis qu'ils réfléchissent les rayons très-réfrangibles, ce qui leur donne une teinte bleue ou verte par diffusion.

3° Par une raison contraire, les substances pour lesquelles α diminue du violet au rouge éteignent les rayons peu réfrangibles, sont bleues par transparence et finissent par ne transmettre que le violet extrême.

4° Les milieux sont verts comme le verre à bouteilles ou les cristaux colorés par le bioxyde de cuivre quand α augmente du rouge au vert pour diminuer du vert au violet. Avec une épaisseur suffisante, ils ne laissent passer que le vert pur.

5° Il y a des matières qui agissent d'une façon plus compliquée : le verre bleu, coloré par le cobalt, réduit le spectre à quatre bandes brillantes : l'une de A en B, l'autre entre C et D, la troisième un peu avant D, la quatrième de E en H; elles sont séparées par trois raies obscures : en C, un peu avant D, et enfin tout près de E. La dissolution alcoolique de feuilles d'orties offre cinq raies au lieu de trois.

6° Enfin il y a des matières dites *opaques* pour lesquelles le coefficient α est extrêmement petit, tels sont les métaux; mais α n'est cependant pas nul. Ainsi l'or et tous les métaux qu'on dépose sur le verre par des moyens chimiques sont transparents quand ils sont assez minces.

Les gaz se comportent autrement. — En faisant passer les rayons solaires dans un tube qui contenait de l'acide hypo-azotique, et ensuite à travers un prisme et une lentille, Brewster à trouvé un spectre interrompu par des bandes obscures assez régulières. Il en fut de même avec le chlore et l'iode, et, en général, avec tous les gaz ou vapeurs colorés.

Ces bandes sont composées de raies lumineuses et obscures très-déliées et très-voisines, tout à fait analogues à celles du spectre solaire. En faisant cette remarque, Brewster pensait que l'atmosphère peut produire un effet analogue sur la lumière solaire. Il remarqua en effet que certaines raies, C et F par exemple, sont plus accentuées au moment du lever et du coucher du soleil qu'à midi. M. Janssen confirma cette observation; il étudia ensuite la lumière d'un foyer allumé par ses ordres à une grande distance, et il y vit les raies C et F qu'on n'y apercevait pas en étudiant la flamme à

petite distance. Enfin il retrouva les mêmes raies dans la lumière du gaz observée à travers un long tube de fer rempli de vapeur d'eau à 5 atmosphères. En résumé, les gaz et les vapeurs, par suite l'atmosphère, éteignent certains rayons de réfrangibilité déterminée, et produisent dans le spectre des raies obscures, nombreuses et très-fines.

II. Transmission des rayons calorifiques et chimiques moyens. — Étudions les mêmes rayons compris entre le rouge et le violet, non plus avec l'œil, mais avec la pile de Melloni. Voici comment Masson et nous avons opéré.

Nous produisions un spectre solaire avec un prisme et une lentille de sel gemme, nous placions dans ce spectre une pile assez étroite pour ne recevoir que des rayons d'une même réfrangibilité. Quand elle était fixée dans une couleur déterminée, nous mesurions l'intensité I du faisceau direct, puis nous interposions la substance d'épaisseur e que nous voulions étudier. L'effet galvanométrique se réduisait à I', le rapport de I' à I était égal à α^e. On répétait l'expérience pour toutes les couleurs du rouge au violet.

Trois lames de sel gemme, de verre et d'alun, d'épaisseur commune ont donné les résultats suivants :

Nature des rayons	Rapport $\frac{I'}{I}$.		
	Sel gemme.	Verre.	Alun.
Vert	0,92	0,91	0,92
Jaune	0,92	0,93	0,94
Rouge limite.....	0,93	0,85	0,84

Si l'on tient compte des pertes de chaleur occasionnées par la réflexion à l'entrée et à la sortie, on voit que les substances transparentes qui laissent passer toute la lumière, laissent aussi passer intégralement la propriété calorifique, il en est encore de même quand on augmente l'épaisseur des lames.

Pour étudier ensuite les milieux colorés, nous avons choisi trois verres l'un vert, l'autre bleu, le troisième violet, qui agissent, comme on le sait, très-inégalement sur les diverses couleurs. Nous les avons placés successivement dans les diverses parties du spectre, et, en même temps que nous mesurions par la pile la chaleur transmise α^e, nous déterminions par un photomètre la proportion de la lumière correspondante qui avait passé.

Les deux tableaux suivants prouvent qu'en un point donné du spectre lumineux les propriétés calorifiques et lumineuses se transmettent toujours dans la même proportion.

SUBSTANCES.	RADIATIONS ÉTUDIÉES.	PROPORTIONS TRANSMISES de lumière.	PROPORTIONS TRANSMISES de chaleur.
Verre vert	Rouge	0,000	0,000
	Orangé	0,044	0,040
	Jaune	0,080	0,098
	Vert	0,217	0,209
Verre bleu	Rouge	0,390	0,375
	Orangé	0,000	0,000
	Jaune	0,008	0,012
	Vert	0,004	0,002
	Bleu	0,132	0,131
	Violet	0,455	0,461
Verre violet	Rouge	0,025	0,032
	Vert	0,000	0,000
	Violet	0,045	0,046

Il en est de même des rayons chimiques correspondants. M. Ed. Becquerel a exécuté, avec l'actinomètre, sur la propriété chimique, les expériences que nous avons faites sur la chaleur avec la pile de Melloni, et il est arrivé à la même conséquence. Donc *les trois propriétés qui se trouvent en un point donné du spectre se transmettent en proportions toujours égales à travers un milieu quelconque.*

Il suit de là que ces trois propriétés sont jusqu'à présent inséparables, et que par conséquent elles n'appartiennent pas à des causes différentes. La chaleur, la lumière et la radiation chimique de mêmes réfrangibilités sont donc trois effets d'une cause unique.

III. Transmission des chaleurs obscures. — L'œil ne peut rien nous apprendre sur les chaleurs obscures, puisqu'il ne les voit pas; leurs propriétés ne peuvent plus être prévues, il faut les étudier avec la pile de Melloni. Voici les résultats :

Nature des rayons.	CHALEURS TRANSMISES. Sel gemme.	Verre.	Alun.
Rouge limite	0,93	0,85	0,84
Obscur limite O_1	0,92	0,88	0,41
Obscur O_2	0,92	0,54	0,29
Obscur O_3	0,92	0,22	»
Obscur O_4	0,90	»	»

On voit que le sel gemme, le verre et l'alun se conduisent très-diversement :

1° Le sel gemme laisse passer en totalité toutes les chaleurs obscures; il est transparent et *athermochroïque*, aussi bien pour les lumières que pour les chaleurs obscures. C'est le seul corps qui possède cette propriété qui a été découverte par Melloni.

2° Le verre commence à absorber les rayons quand ils commencent à devenir obscurs. Le coefficient α va donc en diminuant avec la réfrangibilité.

3° L'alun se comporte comme le verre, avec cette différence que la proportion de chaleur absorbée augmente plus rapidement.

4° En général, tous les corps transparents ou colorés agissent comme le verre et l'alun. Il en résulte que leur interposition dans le spectre tend à en diminuer l'étendue et à le réduire à la partie visible. On peut les ranger dans l'ordre suivant par rapport à leur diathermanéité décroissante :

Sel gemme,	Cristal de roche,
Fluorine,	Alun,
Spath d'Islande,	Eau liquide,
Verre,	Eau congelée.

5° Quand on noircit, avec du noir de fumée, le verre, la fluorine ou le sel gemme, ils éteignent toute lumière, mais restent diathermanes pour les chaleurs qu'ils transmettaient primitivement. Il en est de même pour le quartz enfumé.

6° M. Tyndall vient de découvrir que le sulfure de carbone et l'iodure d'éthyle sont presque aussi diathermanes que le sel gemme, et qu'en y dissolvant de l'iode jusqu'à les rendre opaques, ils éteignent toute lumière, et laissent passer les rayons obscurs. Un ballon de verre rempli de ces solutions et exposé au soleil fait un foyer calorifique assez intense pour enflammer de la poudre et rougir les métaux.

IV. **Transmission des rayons ultra-violets.** — M. Edmond Becquerel a étudié la transmissibilité des rayons ultra-violets à travers diverses substances :

1° Le quartz, le sel gemme les laissent tous passer. Viennent ensuite l'alcool, quelques essences, et enfin, à un moindre degré, le verre et l'eau.

2° En remplissant de divers liquides une auge de quartz de 15 centimètres d'épaisseur, on a trouvé qu'ils éteignent les rayons les plus réfrangibles à partir de la raie T, de sorte qu'ils raccourcissent le spectre et

tendent à le réduire à la partie lumineuse. La limite des rayons qui passent est indiquée par le nom de la raie correspondante :

Essence de térébenthine	N.
Eupione, aldéhyde, iodure d'amyle, essence de citron, acide azotique.	M.
Créosote, essence d'amandes amères, bisulfate de quinine, verre d'urane.	H.

II. — TRANSMISSION DES FAISCEAUX COMPLEXES. EXPÉRIENCES DE MELLONI.

On vient de voir comment chaque radiation simple se comporte à travers les divers milieux. Si maintenant on considère le faisceau total provenant d'une source quelconque, l'effet sera complexe et égal à la somme des actions exercées sur chacune des radiations simples qui composent le rayonnement.

Soient d'après les notations convenues $O_1, O_2, \ldots, O_7$ les intensités des sept groupes de chaleur obscure; $L_1, L_2, \ldots, L_7$ celles des rayons lumineux depuis le rouge jusqu'au violet; enfin $A_1, A_2, \ldots, A_7$ les intensités des sept groupes de radiations ultra-violettes entre les raies H et T. Nous exprimerons par I l'intensité totale du faisceau mixte émis par une source :

$$I = (O_1 + O_2 + \ldots + O_7) + (L_1 + L_2 + \ldots + L_7) + (A_1 + A_2 + \ldots + A_7).$$

En passant à travers une lame d'une substance quelconque, dont l'épaisseur est e, chaque radiation simple se transmet suivant la formule (1), page 582, avec des coefficients de transmission différents; nous les désignerons par $\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_7$ pour la chaleur obscure, par $\beta_1, \beta_2, \ldots, \beta_7$ pour la lumière, et par $\gamma_1, \gamma_2, \ldots, \gamma_7$ pour les rayons ultra-violets. Le faisceau total deviendra

$$I' = (O_1 \alpha_1^e + \ldots + O_7 \alpha_7^e) + (L_1 \beta_1^e + \ldots + L_7 \beta_7^e) + (A_1 \gamma_1^e + \ldots + A_7 \gamma_7^e),$$

et, en prenant le rapport de I' à I,

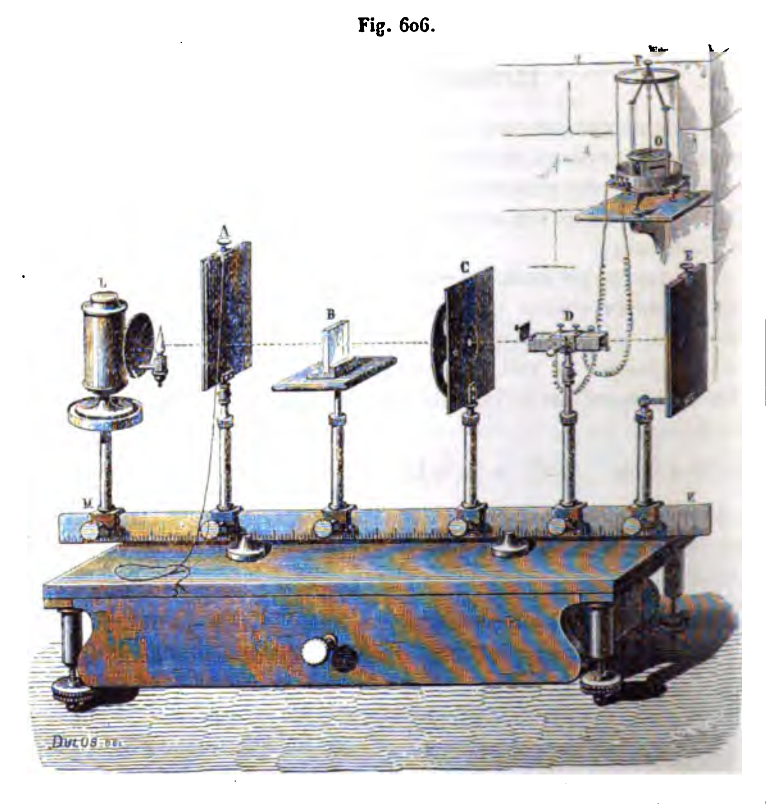
$$(2) \quad \frac{I'}{I} = \frac{(O_1 \alpha_1^e + \ldots + O_7 \alpha_7^e) + (L_1 \beta_1^e + \ldots + L_7 \beta_7^e) + (A_1 \gamma_1^e + \ldots + A_7 \gamma_7^e)}{(O_1 + \ldots + O_7) + (L_1 + \ldots + L_7) + (A_1 + \ldots + A_7)}.$$

Il est évident, d'après cette formule, que le rapport $\frac{I'}{I}$ doit changer : 1° avec la composition primitive du faisceau incident; 2° avec la nature de la substance traversée; 3° avec l'épaisseur e. 4° La composition

du faisceau primitif sera altérée, puisque chacun des rayons qui le composait aura diminué dans des proportions différentes. Melloni a étudié la question à ce point de vue et l'on va voir que ses expériences ont justifié la conclusion précédente.

Appareil de Melloni. — Sur une table de bois repose une règle métallique MN (*fig.* 606) le long de laquelle glissent plusieurs colonnes qui

Fig. 606.



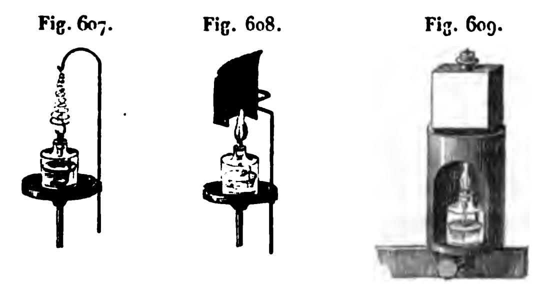
portent les pièces de l'appareil. Ces pièces sont : 1° une source calorifique L; 2° un écran A, formé par une double lame de laiton que l'on peut élever ou abaisser autour d'une charnière horizontale : on le manœuvre en le tirant par un fil de soie sans le toucher avec la main, afin de ne pas l'échauffer; 3° une petite table de bois qui supporte les substances B que la chaleur doit traverser; 4° un écran limitateur C percé

d'orifices plus ou ou moins larges destinés à restreindre l'étendue du faisceau; 5° la pile thermo-électrique D, dont les faces opposées sont couvertes de noir de fumée, et garnies de tuyaux prismatiques de cuivre. Ces tuyaux, qui s'ouvrent ou se ferment par des portes à charnière, reçoivent et conduisent à la pile les rayons partis de la source L, et arrêtent ceux qui viennent des corps voisins; 6° le galvanomètre FO, qui est relié à la pile par des fils conducteurs et qui repose sur une tablette invariable scellée contre un mur; 7° un dernier écran E, qui empêche tout rayonnement opposé d'arriver sur la deuxième face de la pile.

Cet appareil est d'une sensibilité si grande, qu'il suffit d'approcher la main à 30 centimètres de la pile pour imprimer à l'aiguille une déviation de 20 à 25 degrés. Il faut donc éviter avec soin toute cause extérieure de réchauffement et s'entourer d'une foule de précautions pour obtenir des mesures exactes.

Sources de chaleur. — Melloni a étudié avec cet appareil les sources de chaleur les plus diverses; ce sont : 1° le rayonnement solaire; 2° la lampe d'Argant; 3° la lampe de Locatelli L (*fig.* 606), qui n'a point de cheminée, mais qui porte un réflecteur métallique; 4° une spirale de platine placée au-dessus d'une lampe à alcool (*fig.* 607); elle y devient in-

Fig. 607. Fig. 608. Fig. 609.



candescente et se maintient rouge quand on souffle la lampe; 5° une lame de cuivre noirci (*fig.* 608), que l'on chauffe à 400 degrés par une flamme d'alcool; 6° enfin un cube plein d'eau toujours maintenue en ébullition (*fig.* 609).

Melloni mesurait successivement les intensités des faisceaux directement envoyés par la source et transmis par la lame B. Voici leurs rapports exprimés en centièmes du rayon direct.

	LAMPE de Locatelli.	PLATINE incandescent.	CUIVRE à 400 degrés.	CUBE à 100 degrés.
Rayonnement direct..	100	100	100	100
Sel gemme	92	92	92	92
Fluorure de calcium..	78	69	42	33
Spath d'Islande	39	28	6	0
Verre de glace	39	24	6	0
Cristal de roche......	37	28	6	0
Acide citrique	11	2	0	0
Alun................	9	2	0	0
Glace très-pure......	6	0	0	0

Ces résultats justifient les conclusions que nous avons tirées de la formule (2) :

1° Le rapport $\frac{I'}{I}$ change avec la source. Les rayons émis par l'eau bouillante sont des rayons obscurs très-peu réfrangibles; ils passent à travers le sel gemme et le fluorure de calcium; ils sont arrêtés par les autres substances. A mesure que la température des sources s'élève, la réfrangibilité des rayons augmente, et ils sont plus transmissibles. Enfin la lampe de Locatelli envoyant, outre les rayons obscurs, beaucoup de radiations lumineuses, on voit augmenter notablement la proportion des rayons réfractés.

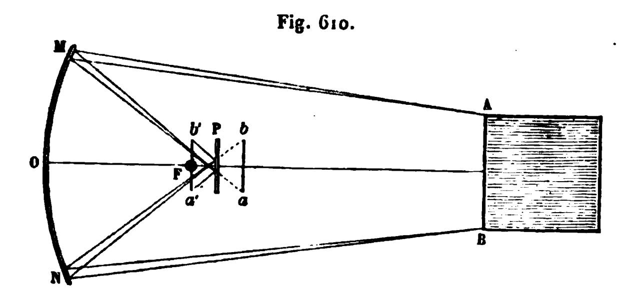
2° Dans ces divers cas, ce sont les rayons les plus réfrangibles qui passent, ce sont les seuls qui restent dans le faisceau transmis, et ils sont plus aptes que le faisceau primitif à traverser une lame d'alun ou de verre : c'est ce que l'expérience vérifie et ce que Prévost, de Genève, avait découvert depuis longtemps. Au contraire, un rayonnement qui, à travers le sel gemme noirci, s'est dépouillé des chaleurs lumineuses, est entièrement arrêté par l'alun. Voici les proportions de chaleur que transmet une combinaison de deux substances différentes :

1re substance.	2e substance.	Proportion transmise.
Sel gemme noirci.	Alun.	0
Sel gemme.	Alun.	9
Verre de glace.	Alun.	27
Acide citrique.	Alun.	85
Alun.	Alun.	29

III. — RÉFLEXION.

Voulant comparer la proportion de la chaleur réfléchie par diverses substances, Leslie plaçait devant un miroir MN un cube AB rempli d'eau bouillante (*fig.* 610). Les rayons réfléchis tendaient à former une image

Fig. 610.

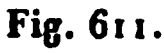


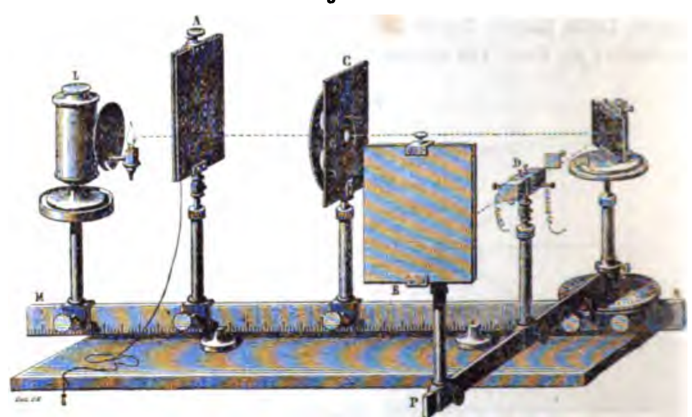
renversée *ba* de la face AB. Mais avant d'arriver à ce plan focal, ils étaient reçus en P sur des lames de diverses substances, de dimensions égales, et polies sur leur surface antérieure. Là ils étaient réfléchis de nouveau et se concentraient en *a'b'* où l'on fixait un thermomètre différentiel F. Les différentes lames placées en P interceptent une partie toujours égale de la chaleur émise par AB; elles laissent arriver au miroir MN et reçoivent sur leur face antérieure un faisceau toujours égal; par suite, les élévations de température du thermomètre F sont proportionnelles à la chaleur réfléchie par les lames, et leur rapport mesure celui des *pouvoirs réflecteurs* des diverses substances. Leslie trouva que le laiton poli possède le plus grand pouvoir réflecteur; il le prit comme terme de comparaison, le désigna par 100, et ceux des autres corps furent proportionnellement exprimés par les nombres suivants :

Laiton	100	Plomb	60
Argent	90	Étain amalgamé	50
Étain	85	Verre	62
Étain plané	80	Verre huilé	5
Acier	70	Noir de fumée	0

Ces résultats ne donnent qu'une idée très insuffisante des pouvoirs réflecteurs, car on prévoit qu'ils doivent varier avec la nature des rayons et avec leur inclinaison. Melloni reprit la question à l'aide de son thermomultiplicateur, disposé comme le montre la *fig.* 611. La règle MN soutient : 1° la source calorifique L; 2° l'écran A que l'on manœuvre en tirant un

fil de soie sans le toucher avec la main; 3° l'écran limitateur C, percé d'orifices plus ou moins larges; 4° le miroir L, qui tourne sur un cercle


Fig. 611.



divisé F. La règle mobile PG soutient l'écran E et la pile thermo-électrique D qui communique avec un galvanomètre; cette règle peut tourner autour de l'axe G, et son inclinaison se lit sur le cercle inférieur *a*. On la dirige d'abord sur le prolongement de MN, afin de mesurer l'intensité du faisceau incident; on place ensuite en I le miroir, on lui donne l'inclinaison voulue, on amène la pile dans la direction des rayons réfléchis, et l'on en mesure l'intensité.

Après Melloni, MM. de la Provostaye et Desains ont mesuré non-seulement la chaleur, mais aussi la lumière réfléchie par les miroirs de verre; ils ont prouvé, conformément à la théorie, que les deux résultats sont égaux, et qu'ils augmentent avec l'obliquité, comme le montre le tableau suivant.

Incidence.	Proportion réfléchie de chaleur.	Proportion réfléchie de lumière.
80°	55,1	54,6
75	40,7	40,8
70	30,6	30,8
60	18,0	18,3
50	11,7	11,7
40	8,1	8,1
30	6,1	6,1
20	5,0	5,0

Il en est de même pour les métaux: seulement, ils réfléchissent inégale-

ment les rayons de réfrangibilité différente. Les métaux jaunes ou rouges réfléchissent de préférence les rayons peu réfrangibles; l'inverse a lieu pour les métaux bleus, tels que le zinc; c'est ce qui ressort du tableau suivant, qui exprime à la fois les proportions de chaleur et de lumière réfléchies sous l'incidence de 70 degrés par quatre métaux différents :

Rayons.	Platine.	Zinc.	Métal des miroirs	Laiton.
Obscurs......	»	»	»	90
Rouges.......	60	60	65	75
Verts.........	59	65	58	63

IV. — DIFFUSION.

Lorsque les surfaces ne sont pas polies, elles renvoient les rayons dans toutes les directions à la fois; c'est le phénomène de la *diffusion*, qui n'est qu'une réflexion irrégulière. La lumière du jour qui nous éclaire vient du Soleil; elle est diffusée par les nuages, par le sol, par les surfaces des maisons, etc. Les divers rayons du spectre sont inégalement diffusés par les substances colorées, parce que leur pouvoir réflecteur varie avec la nature de ces rayons. Voici l'expérience que Newton imagina pour le démontrer.

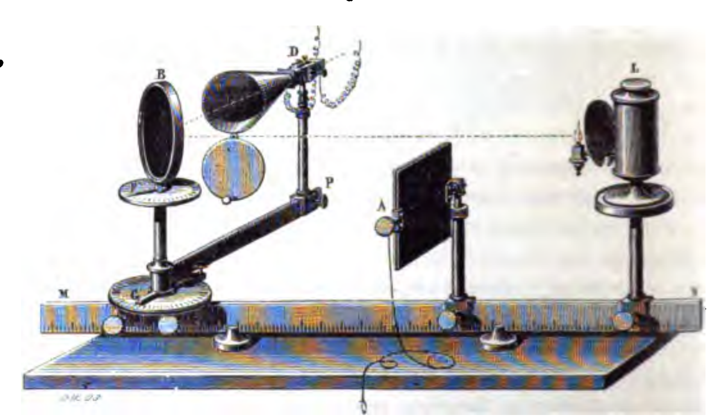
Sur un écran noir on colle une bande verticale de papier blanc, que l'on prolonge en bas par une bande de papier coloré. Si alors on fait tomber sur l'écran un spectre horizontal, on constate que chaque couleur simple conserve sa nuance aussi bien sur la bande colorée que sur la bande blanche, seulement la première renvoie en plus grande proportion les rayons simples qui se rapprochent de sa couleur propre. Si ensuite on éclaire les deux bandes par la lumière blanche et qu'on les regarde à travers un prisme, le papier blanc donne un spectre normal, la bande colorée un spectre incomplet où prédomine sa couleur propre et dans lequel manquent les teintes qu'elle absorbe.

Il y a des corps qui diffusent toutes les couleurs dans les mêmes proportions; ils sont blancs s'ils renvoient beaucoup de lumière, gris s'ils en diffusent moins. Le plus généralement, les proportions sont changées, il y a une couleur qui prédomine; de là les couleurs naturelles des corps. Mais il ne faut pas croire que ces couleurs soient simples; le prisme les résout en une infinité de nuances. Les teintes jaunes contiennent de l'orangé, du jaune et du vert; les tons verts, du jaune, du vert et du bleu; et ainsi de suite. En outre, les couleurs des corps changent avec la lumière

qui les éclaire. Ainsi, la lumière du soleil est jaune ou rougeâtre le matin et le soir, quand le soleil est très-bas; il en est de même des lampes et du gaz d'éclairage; au contraire, le bleu et le violet dominent dans l'arc électrique et dans le clair de lune. Il en résulte qu'au soleil levant ou couchant, et le soir, à la lampe, le bleu passe au vert; le contraire a lieu avec la lumière électrique.

Les mêmes phénomènes ont été étudiés par Melloni, à l'aide de son thermomultiplicateur. Pour démontrer la diffusion de la chaleur, il prend une plaque B de nature quelconque, la couvre de blanc de céruse, par exemple, et l'expose sous une incidence quelconque à l'action d'une source calorique L (*fig.* 612), puis il place la pile sur la règle mobile GP et la

Fig. 612.

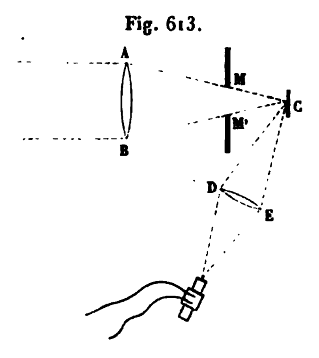


dirige vers la plaque B. L'effet se manifeste aussitôt; mais comme il est extrêmement faible, on a soin, pour le mieux constater, d'armer la pile avec un large cône de laiton poli qui recueille une grande quantité de rayons et les concentre sur les soudures; alors le galvanomètre marque plusieurs degrés, et l'on en conclut que la plaque B, qui a reçu le faisceau calorifique, diffuse de la chaleur vers la pile. Cette action se produit dans toutes les directions. L'effet observé ne dépend pas de l'échauffement de la plaque B, car il est instantané, indépendant de l'épaisseur de cette plaque et ne modifie pas la nature des rayons incidents.

Melloni a démontré, par ces expériences, que la diffusion est très-inégale pour les divers rayons; le blanc de céruse diffuse beaucoup de lumière et peu de chaleur obscure; le noir de fumée diffuse également les di-

verses radiations, et en très-petite proportion. MM. de la Provostaye et Desains ont mesuré la quantité totale de chaleur diffusée lorsqu'un faisceau mixte tombe sur diverses substances. On couvre de céruse, par exemple, une lame très-petite C (*fig.* 613), et l'on dirige normalement sur elle un faisceau concentré par une lentille et limité par un écran MM'. On reçoit la chaleur diffusée sur une pile armée d'une lentille de sel gemme DE, et l'on trouve que l'effet varie avec l'inclinaison : il est minimum sous la direction normale et augmente progressivement à mesure qu'on incline la pile. Si l'on fait ensuite la somme des rayons envoyés dans tous les sens, on trouve la proportion totale de la chaleur diffusée :

Fig. 613.



	Diffusion totale
Céruse	0,82
Argent en poudre	0,76
Chromate de plomb	0,66
Cinabre	0,48

CHAPITRE VII.

ÉMISSION, ABSORPTION.

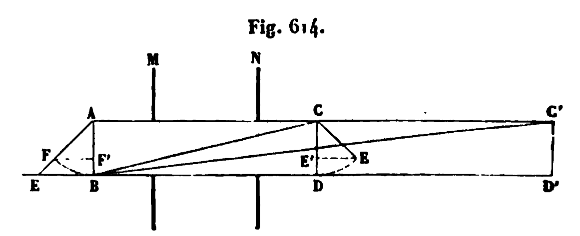
Quand ils sont échauffés, les corps émettent des radiations qui ne sont jamais simples; elles sont, au contraire, composées d'un ensemble de rayons dont la réfrangibilité varie avec la température. Au-dessous de 100 degrés, ce sont des rayons qui traversent difficilement le sel gemme, et qui sont les moins réfrangibles de tous. Au-dessus et en s'éloignant de 100 degrés, il s'y ajoute d'autres radiations encore obscures, mais se rapprochant du spectre visible. A 525 degrés, la limite descend jusqu'au rouge; vers 720 degrés, elles vont jusqu'à la raie C; à 780 degrés, jusqu'à G, et dépassent H à 1165 degrés. Les rayons chimiques se montrent ensuite, à des températures supérieures.

Considérons l'une quelconque des radiations émises, les lois qu'elle suivra seront applicables à toutes les autres.

I. — LOI GÉNÉRALE DE L'ÉMISSION.

Un petit élément de surface $AB = s$ (*fig.* 614) enverra normalement sur $CD = 1$, à une distance $BD = 1$, une quantité de rayons qui est proportionnelle à s et à un facteur qui caractérise la source que l'on considère

Fig. 614.



qui est son pouvoir émissif, et que nous représenterons par E. Si CD, au lieu d'être égale à l'unité, est s', elle recevra Ess'; si elle s'éloigne en C'D', jus-

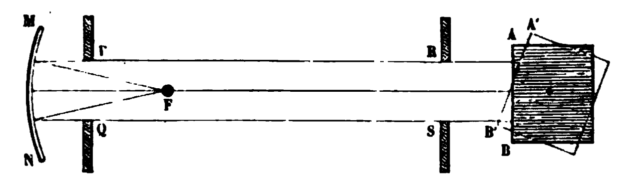
qu'à une distance double ou triple, sa surface apparente, vue de B, deviendra 4 ou 9 fois moindre, et la quantité de rayons qu'elle recevra sera 4 ou 9 fois plus petite; en général, cette quantité sera en raison inverse du carré de la distance r, et s'exprimera par $\frac{Ess'}{r^2}$.

Si CD s'incline d'un angle i' sur sa direction primitive et se place en CE, elle ne recueillera que les rayons qui passent sur sa projection $CE' = s' \cos i'$, c'est-à-dire une quantité égale à $\frac{Ess' \cos i'}{r^2}$. De même si la surface échauffée AB était inclinée de i, elle se trouverait réduite à sa projection AF' et enverrait sur CE une quantité de rayons Q, qui serait

$$Q = \frac{Es \cos i \, s' \cos i'}{r^2}. \tag{1}$$

Pour justifier cette loi de l'émission oblique, on remarque que si l'on regarde ou le soleil ou un boulet rougi, on les voit comme des disques plans, ce qui prouve qu'une portion quelconque de leur surface émet la même quantité de lumière que leur projection sur un plan normal aux rayons. On arrive à la même conséquence par une expérience de Leslie, en limitant par des écrans PQ, RS (*fig.* 615) le flux calorifique émis par une

Fig. 615.



surface AB, le recevant sur un miroir MN et ensuite sur un thermomètre F. L'effet ne change point si l'on incline la surface AB d'un angle I quelconque.

La formule (1) exprime la loi générale de l'émission; E varie à la fois avec la substance considérée, avec la température à laquelle elle a été portée; il varie aussi, et graduellement, avec la réfrangibilité du rayon que l'on considère. Nous allons commencer par réunir ces rayons en groupes, en attribuant à E une valeur moyenne que nous supposerons commune à chaque radiation.

II. — ÉMISSION DES CHALEURS OBSCURES.

Comparaison des pouvoirs émissifs. — Pour comparer les pouvoirs émissifs de diverses surfaces, Leslie plaçait devant un miroir concave (*fig.* 615) un cube AB rempli d'eau bouillante, dont les quatre faces verticales étaient couvertes : la première de noir de fumée, et les autres de diverses substances qu'on voulait étudier. Au foyer du miroir MN, était disposée la boule F d'un thermomètre différentiel, revêtue de noir de fumée; elle s'échauffait et arrivait à un excès final de température.

Après Leslie, MM. de la Provostaye et Desains ont remplacé le miroir et le thermomètre par la pile de Melloni; ils ont obtenu les nombres suivants, qui représentent les pouvoirs émissifs de diverses surfaces comparés à celui du noir de fumée, pris comme unité :

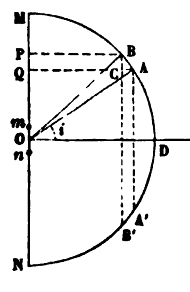
Noir de fumée.........	1,00	Platine................	0,11
Céruse................	1,00	Cuivre.................	0,05
Colle de poisson.......	0,91	Or....................	0,04
Encre de Chine........	0,85	Argent.................	0,03
Gomme laque.........	0,72	Argent bruni..........	0,02

On voit qu'à 100 degrés, les divers corps ont des facultés émissives très-diverses; elles ne dépendent point de la couleur, comme l'avait cru Leslie. En général, elles augmentent avec la rugosité des surfaces; mais cela tient plutôt aux changements de densité que l'on produit en polissant ou en rayant les corps. Ce qu'il faut signaler, c'est le peu de pouvoir émissif des métaux.

Influence de la température. — Quand la température croît, E augmente; tant qu'elle ne dépasse pas 100 ou 200 degrés, on peut admettre que E lui est proportionnel. Posons donc $E = et$, et il vient

$$Q = et\,\frac{s\cos i\, s'\cos i'}{r^2};$$

Fig. 616.



Q représente la chaleur envoyée par la surface s sur s', sous des angles d'émission et d'incidence égaux à i et à i'. Cherchons la somme des chaleurs envoyées par $mn = s$ (*fig.* 616) sur tous les éléments AB de la sphère décrite de O, comme centre, avec un rayon égal à l'unité. AB reçoit la chaleur normalement; $i' = 0$, et l'on a

$$Q = et\,\frac{ss'\cos i}{r^2};$$

$s'\cos i$ est la projection PQ de AB sur MN.

Si donc on fait la somme de toutes les chaleurs envoyées sur des éléments

tels que AB, elle sera égale au produit de $\frac{ets}{r^2}$ par la somme des projections telles que PQ, c'est-à-dire par la surface du grand cercle dont MN est le diamètre, ou par π; on a donc

$$Q = \pi ets = \epsilon ts.$$

Cette quantité de chaleur est celle que la surface s rayonne par l'une de ses faces dans toutes les directions. On peut dire que si et est son pouvoir émissif dans la direction normale, πet ou ϵt représente son pouvoir émissif total.

Vitesse de refroidissement. — Pendant un temps très-court τ, un corps échauffé se refroidit d'un certain nombre de degrés, et sa température tombe de t' à t''. S'il continuait ainsi pendant l'unité de temps, l'abaissement de température serait égal à la quantité $v = \frac{t' - t''}{\tau}$. v est ce que l'on nomme la *vitesse du refroidissement*. En la multipliant par la chaleur spécifique C et par le poids P du corps, on a la chaleur totale que ce corps perdrait dans l'unité de temps :

$$Q = PCv.$$

Soit, d'un autre côté, t l'excès moyen de la température du corps sur celle de l'enceinte pendant l'intervalle considéré; la perte de chaleur, pendant l'unité de temps, sera $S\epsilon t$; par conséquent

$$Q = PCv = S\epsilon t$$

et

$$v = \frac{S\epsilon}{PC} t.$$

On voit que la vitesse du refroidissement est, à chaque instant, proportionnelle à l'excès de température. Cette loi étant donnée, le calcul prouve que les excès de température décroissent comme les termes d'une progression géométrique pendant que le temps τ croît en progression arithmétique, comme l'exprime la formule suivante :

$$t = t_0 e^{-\frac{S\epsilon\tau}{PC}},$$

dans laquelle t_0 est l'excès initial, et e la base des logarithmes naturels. Cette loi a été énoncée par Newton. Pour la vérifier par l'expérience, il suffit de chauffer un thermomètre et de le laisser refroidir dans l'air, en notant l'excès initial t_0 et, de minute en minute, les excès t. On trouve alors que la formule est exacte si ces excès ne dépassent pas 20 à 30 degrés; mais elle ne l'est que dans ces limites : au delà, le refroidissement suit des lois beaucoup plus compliquées qui ont été étudiées par Dulong et Petit, mais que nous n'exposerons pas.

III. — ÉMISSION DE LA LUMIÈRE.

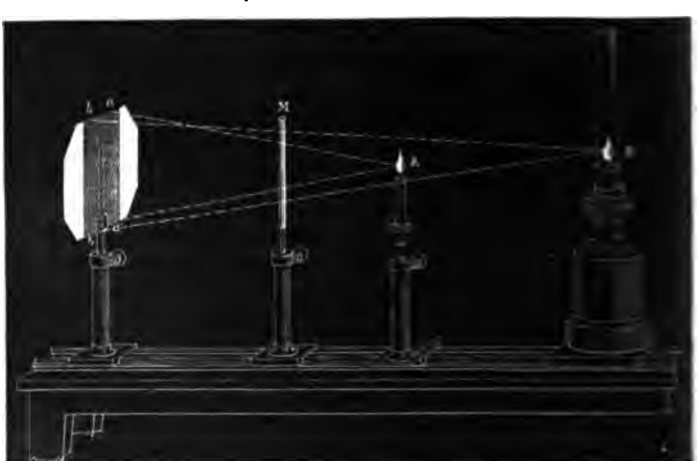
Supposons maintenant une substance portée à une température assez haute, pour émettre de la lumière blanche. La quantité de cette lumière, envoyée de s à s', sous des angles d'émission et d'incidence, i et i', est toujours

$$Q = E \frac{s \cos i \, s' \cos i'}{r^2}.$$

Le coefficient E se nomme ordinairement l'*éclat* du luminaire ; il est variable avec la nature de ce luminaire et avec sa température. La question est de mesurer Q. On emploie pour cela des instruments qu'on nomme *photomètres*.

Photomètres de Rumford et de Bouguer. — Soient A et B (*fig.* 617) deux luminaires qu'on veut comparer, M une tige opaque placée devant un écran blanc $ba\,b'a'$.

Fig. 617.



La bougie A projette une ombre aa', qui n'est éclairée que par la lampe B ; la lampe projette l'ombre bb', qui est éclairée par la bougie seule. En réglant les distances de A et de B, on arrive à saisir nettement l'instant où les ombres aa', bb' présentent la même illumination ; on mesure alors les distances r et r' de A et de B à l'écran.

Bouguer a modifié l'appareil comme il suit. Il sépare les deux luminaires

par un carton noirci **M**, de manière qu'ils éclairent : l'un la partie a, l'autre la partie b d'un écran en verre dépoli (*fig.* 618).

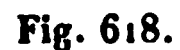
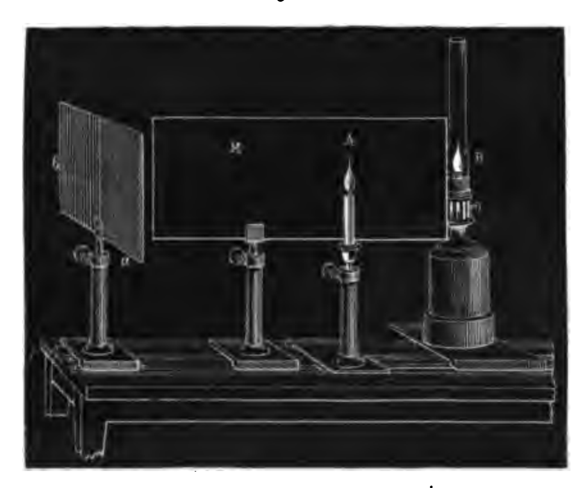


Fig. 618.



On mesure de même les distances r et r', pour lesquelles l'illumination de l'écran est la même en a et en b.

Mesure des pouvoirs éclairants. — Quel que soit l'appareil employé, les rayons sont envoyés normalement à l'écran : par conséquent $i' = 0$; les deux ombres ont une étendue s' égale ; les deux surfaces apparentes des luminaires sont égales à la somme de celles de leurs éléments qui sont $s \cos i$, $s_1 \cos i_1$; nous pouvons les représenter par σ, σ' ; les éclats sont E, E' ; les lumières envoyées sont

$$Q = \frac{E \sigma s'}{r^2}, \quad Q' = \frac{E' \sigma' s'}{r'^2};$$

et, puisqu'elles sont égales,

$$\frac{E\sigma}{r^2} = \frac{E'\sigma'}{r'^2},$$

d'où

$$(2) \qquad \frac{E\sigma}{E'\sigma'} = \frac{r^2}{r'^2};$$

$E\sigma$, $E'\sigma'$ représentent les quantités de lumière envoyées par les deux luminaires sur l'unité de surface à l'unité de distance, c'est ce qu'on nomme *leur pouvoir éclairant total*. L'équation (2) en déterminera le rapport.

Ainsi, pour évaluer les dépenses de l'éclairage à l'huile et au gaz, on compare : 1° les pouvoirs éclairants d'une lampe Carcel et d'un bec à gaz, 2° les prix des matières brûlées dans les deux cas pendant un temps égal, et l'on en conclut les dépenses relatives pour une même somme de lumière.

Mesure des éclats de deux sources. — Si l'on voulait comparer les éclats des deux flammes, on aurait

$$\frac{E}{E'} = \frac{\sigma}{\sigma'}\frac{r^2}{r'^2};$$

il faudrait alors mesurer les surfaces σ, σ' des deux flammes, ou bien les réduire par des écrans à être égales. Voici quelques exemples.

Le diamètre apparent du Soleil et celui de la Lune sont tous deux d'environ $\frac{1}{2}$ degré ; la grandeur apparente de ces astres est à peu près celle d'un disque de 9 millimètres, vu à la distance de 1 mètre. On peut donc les remplacer par ce disque, supposé à cette distance ; σ' sera égal à $\frac{1}{15000}$, r' à l'unité ; et soit x l'éclat inconnu. Désignons maintenant par E l'éclat, par s la surface d'une lumière terrestre placée à une distance r telle qu'elle équivaille à l'astre dans le photomètre, on aura

$$\frac{x}{E} = \frac{15000\,\sigma}{r^2}.$$

On a trouvé de cette manière que l'éclat de la Lune n'est que les deux tiers de celui d'une bougie. L'éclat du Soleil, d'après Bouguer, surpasse 300 000 fois celui de la Lune.

L'illumination que produit le Soleil équivaut à environ 50 000 bougies placées à 1 mètre de distance ; l'illumination par la Lune ne représente que $\frac{1}{3}$ de bougie à la même distance de 1 mètre.

Photométrie chimique. — On peut, à l'aide de procédés analogues à ceux qui viennent d'être décrits, évaluer le *pouvoir chimique* ou l'*éclat chimique* du Soleil et des sources de lumières artificielles. On n'a qu'à remplacer la rétine de l'œil par une feuille de papier photographique et à chercher les distances où deux sources produisent le même effet dans le même temps.

MM. Bunsen et Roscoë ont trouvé, par ce moyen, que l'éclat chimique du magnésium incandescent est très-considérable ; il n'est que 128 fois inférieur à celui des rayons solaires avant leur entrée dans notre atmosphère, qui les affaiblit dans une proportion connue, et il lui devient égal quand le Soleil est élevé d'environ 10 degrés. A une élévation de 22°40',

le rapport des éclats chimiques serait $\frac{1}{15}$; mais l'éclat optique du magnésium ne serait alors que $\frac{1}{525}$ de celui du Soleil. La lumière du magnésium convient donc éminemment aux usages photographiques.

IV. — SPECTRES DES FLAMMES.

Jusqu'à présent, nous avons étudié en bloc les rayonnements provenant des sources diverses, il faut maintenant les décomposer en rayons simples. Cette étude n'a point encore été faite pour les rayons obscurs; elle est très-avancée pour la lumière.

A toute température, les spectres observés sont toujours continus si les substances rayonnantes sont solides ou liquides; c'est ce que l'on peut constater avec la chaux incandescente dans la lampe de Drummond, avec les charbons de l'arc voltaïque, ou pendant la combustion du magnésium. C'est ce qui arrive encore lorsqu'on étudie les flammes qui contiennent des particules charbonneuses incandescentes.

Les apparences sont entièrement changées lorsqu'on décompose par un prisme le rayonnement des gaz incandescents; on obtient alors des spectres très-peu apparents, sur le fond desquels on voit se détacher un petit nombre de traits fort brillants, dont la place est tellement invariable, que dès 1822, Herschel déclarait qu'ils pourraient servir à caractériser et à analyser les matières en combustion.

Nous citerons les exemples les plus remarquables.

I. La lampe à alcool salé émet une lumière jaune qui se réduit par le prisme, non en un spectre, mais à deux traits lumineux qui tiennent la place de la raie D, et qui en comprennent un troisième moins large et moins brillant. Tous les sels métalliques qu'on mêle à l'alcool offrent, à la simplicité près, des résultats pareils, les sels de cuivre ou d'argent des traits verts, ceux de strontiane un groupe de traits rouges. La flamme des hydrogènes carbonés, celle de l'oxyde de carbone, le dard d'un chalumeau, quand le charbon s'y brûle en totalité, donnent un spectre discontinu composé de six traits dans l'orangé, de sept dans le jaune-verdâtre, de trois dans le vert, de cinq dans le bleu, et d'un grand nombre d'autres dans le violet. Ces divers traits caractérisent les substances tenues en vapeur dans les flammes.

II. L'étincelle électrique, entraînant avec elle la matière volatilisée de ses deux conducteurs, devait donner aussi des spectres discontinus; c'est ce qu'avait vu Frauenhofer. Wheatstone reconnut que les traits brillants

de ces spectres changent avec la nature des électrodes. Masson les dessina avec soin. Chaque métal a les siens, et ils se superposent quand on allie deux métaux ou qu'on fait jaillir l'étincelle entre deux conducteurs différents.

III. En étudiant l'arc électrique, Foucault trouva le spectre particulier des hydrogènes carbonés, celui qui caractérise le charbon. En remplaçant le crayon inférieur par un creuset, dans lequel il mettait du cuivre, du zinc, ou de l'argent, il obtint des spectres très-lumineux, à traits brillants Le fer en donne soixante-dix, et tous les métaux reproduisent les apparences que Masson avait découvertes dans l'étincelle.

IV. Enfin Plücker décomposa de même la lumière des tubes de Geissler, il y vit des traits brillants produits soit par les électrodes, soit par les gaz; ceux-ci changent avec la nature de ces gaz et peuvent servir à les caractériser.

V. — ANALYSE SPECTRALE.

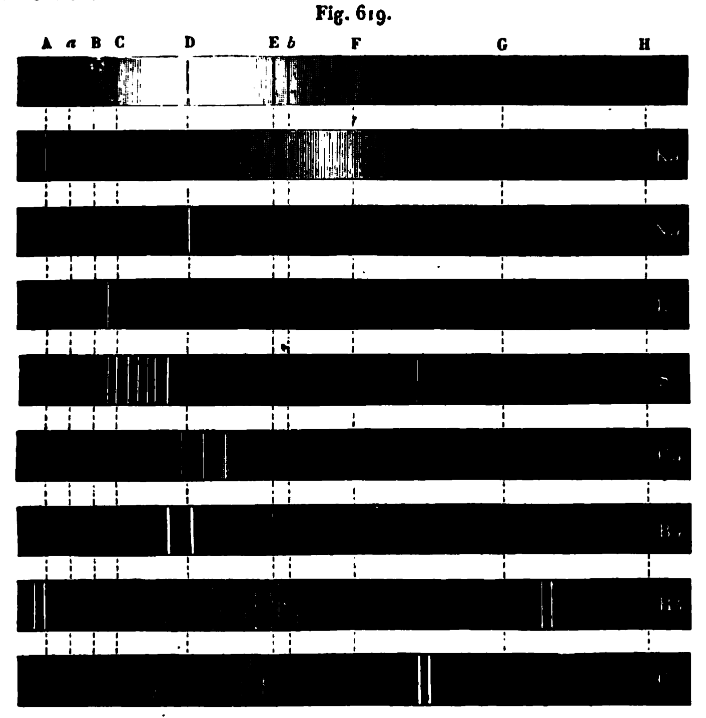
Ces résultats étaient connus, mais la liaison qui existait entre eux avait été à peine soupçonnée, quand MM. Bunsen et Kirchhoff en firent vers 1855, la base d'une nouvelle méthode d'analyse chimique.

Lorsqu'on brûle le gaz d'éclairage mêlé à une grande quantité d'air, dans une lampe qui a été imaginée par M. Bunsen, on obtient une flamme très-chaude, mais peu éclairante, et qui donne un spectre à peine visible et sans raies. Mais vient-on à y introduire un fil fin de platine qu'on a trempé dans une solution saline, elle s'illumine tout à coup, parce que le sel se vaporise, et l'on voit naître dans le spectre les traits qui caractérisent la substance volatilisée (*fig.* 619).

Non-seulement le sel marin montre immédiatement la double raie D, mais tous les sels de soude la donnent. Par conséquent, l'acide ne concourt en rien à la former; elle est due au métal; elle permettra de le reconnaître. En introduisant dans la même lampe un sel quelconque de lithium, on voit de la même manière apparaître deux raies : l'une rouge après B, l'autre jaune-orangé avant D. A son tour, le potassium, à un état de combinaison quelconque, fait naître une raie rouge très-voisine de A, et une seconde qui est violette. Avec les quatre autres métaux alcalins, les résultats se compliquent sans cesser d'être aussi caractéristiques. C'est ainsi que l'on voit dans le spectre du strontium plusieurs raies rouges, une autre qui est dans l'orangé, et une dernière, colorée en bleu intense, qui est située entre F et G. Dans le spectre du calcium, on trouve des bandes orangées et une

belle raie verte; et enfin dans celui du baryum, le plus compliqué de tous, un ensemble nombreux de lignes brillantes comprises entre le rouge et le bleu.

Fig. 619.



En résumé, les six métaux alcalins connus, combinés avec des corps quelconques, déterminent, quand on les introduit dans la flamme, certaines raies spectrales qui les caractérisent et permettent non de les doser, mais de reconnaître leur présence. Tel est le principe de l'analyse spectrale.

Cette méthode est d'une sensibilité extraordinaire. En faisant détoner dans une chambre 3 milligrammes de chlorate de soude, on répand dans l'air une quantité suffisante de sodium pour que le spectroscope en accuse la présence à l'extrémité opposée de la chambre. Grâce à cette prodigieuse sensibilité, on a reconnu l'existence de parcelles de soude dans presque toutes les poussières; on a constaté également que les autres métaux alcalins sont beaucoup plus répandus qu'on ne l'avait supposé. Ce n'est pas tout : la nouvelle méthode a fait découvrir plusieurs nouveaux corps simples, qui se sont révélés par les traits brillants de leurs spectres.

MM. Kirchhoff et Bunsen avaient fait dissoudre 150 kilogrammes de lépidolite de Saxe. Après avoir précipité successivement tous les métaux que la solution contenait, excepté le sodium et le potassium, ils découvrirent au spectroscope, outre les caractères de ces deux métaux, des raies nouvelles qui n'appartenaient à aucun des alcalis connus. Il y en avait deux dans le rouge et deux autres moins vives dans le violet (*fig.* 619). Ils en conclurent que le liquide devait contenir un métal alcalin jusqu'alors inconnu, caractérisé par ces raies rouges si brillantes, et ils le nommèrent *rubidium* (métal rouge). Ils parvinrent ensuite à l'isoler. Le rubidium a pour équivalent 85; il est isomorphe avec le potassium, et il a des affinités plus énergiques que ce dernier.

Dans les eaux mères des salines de Durckheim, les mêmes physiciens découvrirent ensuite un autre métal, le *cæsium*, caractérisé par deux raies bleues. M. Crookes découvrit, à son tour, le *thallium*, qui fut isolé par M. Lamy; il se distingue par une belle raie verte. MM. Reich et Richter ont trouvé de la même manière l'*indium*, qui a une raie très caractéristique de couleur indigo.

Les spectres des métaux alcalins sont relativement simples; mais ceux des autres métaux présentent une complication si grande, qu'il faut renoncer à les employer comme moyens d'analyse. Néanmoins, M. Kirchhoff les a dessinés dans tous leurs détails, en faisant usage d'un spectroscope à plusieurs prismes et en les comparant au spectre solaire. Il faisait arriver les rayons solaires par la moitié inférieure de la fente, pendant qu'au moyen d'un prisme à réflexion, il éclairait la moitié supérieure avec l'étincelle d'induction jaillissant entre deux électrodes métalliques. Il put ainsi constater l'exacte coïncidence des raies brillantes de plusieurs métaux avec certaines raies obscures du spectre solaire. Nous y reviendrons plus loin.

VI. — ABSORPTION.

Quand un faisceau de radiations obscures ou lumineuses rencontre un corps, il y est partiellement transmis, réfléchi ou diffusé; le reste disparaît, il est absorbé.

Loi de Leslie. — Leslie a étudié la question pour les rayons de chaleur obscure. Il nomme *pouvoir absorbant* d'un corps, le rapport entre la chaleur qui disparaît et la chaleur totale, et il compare expérimentalement les pouvoirs absorbants des divers corps à celui du noir de fumée. Pour cela il dirige sur un miroir concave les rayonnements d'un cube rempli d'eau

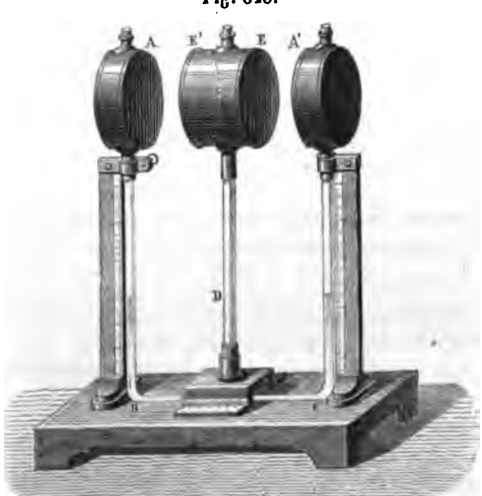
bouillante, et il place au foyer la boule de son thermomètre, qu'il recouvre successivement, d'abord de noir de fumée, ensuite de la substance qu'il veut étudier. La boule arrivait dans les deux cas à des excès de température finale t_1 et t, et Leslie prenait le rapport de ces excès comme mesure du rapport des pouvoirs absorbants des deux substances.

Il avait précédemment mesuré le rapport des pouvoirs émissifs des mêmes corps pour les rayons obscurs émis à 100 degrés, et il trouva que pour toutes les substances le rapport du pouvoir émissif E à celui du noir de fumée E' est égal au rapport du pouvoir absorbant A à celui du noir A' :

$$\frac{E}{E'} = \frac{A}{A'}.$$

Depuis lors, Ritchie institua une expérience pour démontrer cette proposition (*fig.* 620). ABCA' est un thermomètre différentiel dont les boules

Fig. 620.



sont remplacées par des tambours A et A'; entre eux on place un cylindre EE' rempli d'eau chaude. Les faces en regard E' et A sont couvertes : la première de métal, la deuxième de noir de fumée; c'est l'inverse pour les autres faces E, A'. Dans ces conditions, on trouve que les deux réservoirs thermométriques prennent la même température quand EE' est au milieu de leur distance. Or il est évident que A absorbe une quantité de chaleur proportionnelle à son pouvoir absorbant A et au pouvoir émissif E' de la

face en regard, c'est-à-dire une quantité mAE', tandis que A' absorbe $mA'E$; il faut donc que l'on ait

$$AE' = A'E, \quad \frac{E}{E'} = \frac{A}{A'}.$$

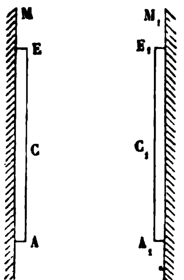
Depuis cette époque, et après s'être beaucoup égarée, la question a été reprise par M. Kirchhoff, qui a confirmé la loi de Leslie en l'interprétant et en la restreignant comme il suit :

1° La proportionnalité des pouvoirs émissifs et absorbants ne se justifie que si les corps sont sensiblement à la même température. En effet, les deux pouvoirs qu'il s'agit de comparer varient quand la température change.

2° Elle n'existe que si l'on compare les pouvoirs émissifs et absorbants d'une même radiation. Il serait, en effet, contraire au bon sens de comparer la faculté que possède un corps d'émettre de la chaleur obscure à celle d'absorber un rayon lumineux.

A ces conditions, la loi est vraie; elle s'applique à toutes les radiations simples, lumineuses, chimiques ou calorifiques. On peut la justifier théoriquement comme il suit :

Fig. 621.



Imaginons deux corps C, C_1 (*fig.* 621) placés dans une enceinte dont la température est uniforme et constante et fixés sur deux miroirs M et M_1 qui aient la propriété de réfléchir totalement les rayons. Supposons que C_1 émette et absorbe partiellement les rayons quels qu'ils soient, tandis que C n'émet et n'absorbe que ceux qui répondent à la raie D. La flamme de l'alcool salé est dans ce cas. Suivons le mouvement de cette lumière D. La lame C en émet une quantité E ; C_1 en absorbe EA_1 et en renvoie $E(1 - A_1)$ vers C ; C, à son tour, en absorbe $E(1 - A_1)A$ et en renvoie $E(1 - A_1)(1 - A) = KE$. Les mêmes alternatives se reproduiront sur KE, et finalement C_1 aura absorbé

$$EA_1 + KEA_1 + K^2EA_1 + \ldots = EA_1(1 + K + K^2 + \ldots) = \frac{EA_1}{1 - K}.$$

De même C_1 émet de ces mêmes rayons une quantité E_1, et, en répétant le raisonnement précédent, on trouve qu'il en absorbe une somme égale à $\frac{E_1A_1(1-A)}{1-K}$.

Or, pour que l'équilibre ait lieu dans l'enceinte, il faut que la quantité E_1 de rayons émis par C_1 soit égale à la quantité absorbée, ou que

$$E_1 = \frac{EA_1}{1 - K} + \frac{E_1A_1(1 - A)}{1 - K}.$$

En remplaçant K par sa valeur et réduisant,

$$\frac{E}{E_1} = \frac{A}{A_1},$$

ce qui montre que la loi de Leslie est nécessaire pour que l'enceinte que nous venons de considérer soit en équilibre de température.

Désignons par E, E_1, E_2,... les pouvoirs émissifs du noir de fumée et de corps quelconques, par A, A_1, A_2,... leurs pouvoirs absorbants. D'après la loi de Leslie, on a

$$\frac{E}{E_1} = \frac{A}{A_1}, \quad \frac{E}{E_2} = \frac{A}{A_2}, \quad \frac{E}{E_3} = \frac{A}{A_3},$$

ou

$$\frac{E}{A} = \frac{E_1}{A_1} = \frac{E_2}{A_2} = \frac{E_3}{A_3} = \cdots,$$

ce qui veut dire que, pour tous les corps de la nature, pris à la même température et pour une même radiation, *le rapport du pouvoir émissif au pouvoir absorbant est le même*. D'où il suit que si le pouvoir émissif d'une substance est très-grand ou très-petit, il en sera de même de son pouvoir absorbant; en d'autres termes, que si un corps a la propriété d'émettre une radiation, il aura celle de l'absorber, et que s'il ne l'émet pas, il se laissera traverser par elle sans l'affaiblir.

Renversement des raies. — Faisons l'application de cette loi aux flammes gazeuses, et comme exemple à celles qui contiennent du sodium. Elles émettent la raie D, et seulement la raie D; par conséquent, elles absorberont la lumière D et ne se laisseront pas traverser par elle; mais elles seront transparentes pour toutes les autres lumières. Pour vérifier cette conséquence, on projette le spectre des charbons de la lumière électrique : il est continu et sans raies. On intercalle dans le trajet une large lampe d'alcool salé, et l'on voit apparaître aussitôt les trois raies noires D. Si l'on éteint l'arc électrique, la même lampe donne un spectre réduit aux trois traits brillants qui constituent D.

On peut répéter la même expérience avec des flammes contenant de la lithine ou de la potasse en vapeur. En général, quand une lumière provenant d'une source à température très-élevée traverse une atmosphère incandescente, on voit dans son spectre des raies obscures qui tiennent exactement la place des traits brillants que donne la lumière de l'atmosphère.

Application aux corps célestes. — Cette théorie peut s'appliquer au Soleil. S'il était un corps solide à très-haute température, il devrait donner un spectre continu, ce qui n'est pas; s'il était une masse gazeuze incandescente, on aurait un spectre à traits brillants discontinus, ce qui est encore contraire aux faits. Il faut donc qu'il soit, comme la raison l'indique, constitué par un noyau enveloppé d'une atmosphère gazeuse. Le noyau donnerait un spectre continu, l'atmosphère absorbe les traits qu'elle four-

nirait elle-même, et sillonne le spectre de raies noires ; ces raies tiennent la place des traits brillants qui caractérisent les vapeurs contenues dans l'atmosphère elle-même.

De là le moyen de savoir quelles substances existent dans le Soleil. Le sodium s'y trouve, puisqu'on voit la raie D. On y reconnaît également le potasium, le calcium, le magnésium, le chrome, le nickel et le fer, peut-être aussi le cobalt, l'aluminum, le cuivre, le manganèse et le zinc; mais l'or, l'argent, le plomb, l'étain, l'antimoine, le cadmium, l'arsenic, le mercure, le lithium et le silicium ne s'y trouvent point.

Il y a encore une substance dont il faut surtout noter la présence dans le Soleil, c'est l'hydrogène.

Par l'objectif d'une grande lunette, on fait une image du Soleil au foyer et on place en ce foyer, à la place du réticule, la fente étroite d'un spectroscope. Si elle est placée sur le bord même du Soleil, on obtient un spectre composé uniquement d'un petit nombre de raies brillantes, dont la plupart appartiennent à l'hydrogène. Les mêmes raies forment le spectre des protubérances roses que l'on observe pendant les éclipses totales de Soleil. On peut en conclure que les protubérances sont des élévations accidentelles d'une atmosphère incandescente, composée principalement d'hydrogène, qui entoure la photosphère ou la partie la plus lumineuse du Soleil. Ces raies brillantes du spectre des bords solaires ont été découvertes en 1868 par M. Janssen.

Les planètes et la Lune n'ayant pas de lumière propre, leurs spectres ne diffèrent pas du spectre solaire. Il en est autrement des étoiles fixes; elles offrent, comme le Soleil, des raies obscures, mais autrement distribuées. Aldébaran montre C et F qui appartiennent à l'hydrogène, la raie D qui indique le sodium, E et *b* qui caractérisent le fer et le magnésium. Syrius renferme à peu près les mêmes substances, mais α d'Orion et β de Pégase ne contiennent pas d'hydrogène : ce sont des mondes sans eau.

Le 12 mai 1866, on vit tout à coup l'étoile τ, de la Couronne, prendre un éclat extraordinaire, qu'elle perdit bientôt après. La lumière analysée fit voir les traits brillants caractéristiques de l'hydrogène. Cette étoile a donc été envahie par un incendie ; c'était de l'hydrogène qui brûlait à sa surface.

Les nébuleuses sont de deux sortes : celles qui sont résolubles en étoiles elles ont des raies obscures; celles qui n'ont jamais pu se résoudre et émettent des traits brillants, elles sont constituées par des gaz illuminés. Enfin les queues des comètes émettent la lumière du Soleil qu'elles réfléchissent, mais le noyau est le plus souvent un gaz incandescent.

CHAPITRE VIII.

TRANSFORMATION DES RADIATIONS.

Nous venons de voir qu'une portion des rayons qui rencontrent un corps disparaît, elle est absorbée. Cherchons ce qu'elle devient. Généralement elle échauffe le corps, qui se dilate et qui alors rayonne dans l'espace, même après l'action qui l'a échauffé. Il ne rend pas les rayons tels qu'il les a reçus; s'il a été frappé par une radiation jaune, par exemple, il rend de la chaleur obscure dont la réfrangibilité est moindre. C'est un phénomène analogue à celui du son: un timbre est ébranlé par un marteau; il en absorbe la force vive, qui se distribue dans sa masse et se transforme en un mouvement vibratoire qui, à son tour, est rayonné dans l'espace. De même les rayons solaires laissent leur force vive dans les corps qu'ils rencontrent : ceux-ci s'ébranlent avec la durée vibratoire qui leur est propre, et rayonnent de la chaleur obscure. On va voir que la phosphorescence est due à la même cause.

I. — PHOSPHORESCENCE.

On sait de toute antiquité que le diamant, après avoir été exposé au soleil, reste lumineux pendant quelque temps. Ce fut le seul exemple de phosphorescence connu jusqu'en 1604, où un artisan de Bologne, Vincent Calciarolo, découvrit la même propriété dans les coquilles calcinées; elles la doivent au sulfure de calcium qui se forme pendant qu'on les chauffe. Les sulfures de baryum, de strontium sont dans le même cas. Ils ont été spécialement étudiés par M. Ed. Becquerel.

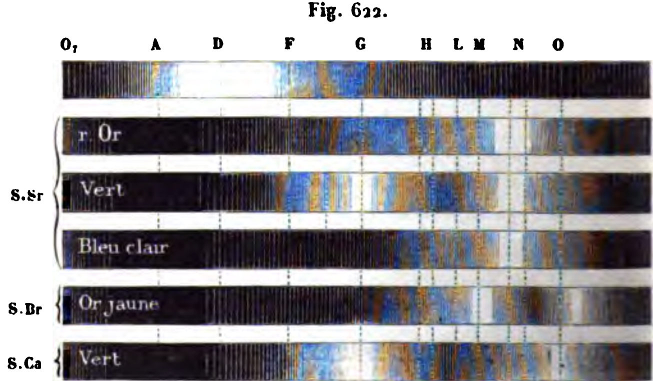
Pour développer la phosphorescence, il convient de se placer dans une chambre obscure, de fermer les yeux, d'ouvrir un volet pour exposer au soleil le corps qu'on veut étudier, de retirer ce corps et d'ouvrir les yeux au moment même où l'on ferme le volet. On voit le sulfure continuer d'être brillant. Suivant son origine et la manière dont il a été préparé, il offre des teintes très-diverses, depuis le rouge jusqu'au violet. Certains restent

lumineux pendant deux jours, le diamant pendant plusieurs heures, la fluorine pendant quinze ou vingt secondes; le spath s'éteint après un quart de seconde. On verra qu'il y a des phosphorescences encore plus fugitives.

Action de la chaleur. — Aussitôt qu'on chauffe dans l'obscurité un sulfure qui a subi l'action de la lumière, il devient plus brillant; mais il s'éteint beaucoup plus vite. Il avait absorbé une certaine somme de force vive et la rendait lentement à froid; chauffé, il la dépense plus vite, et quand il l'a perdue tout entière, il est apte à en reprendre par une nouvelle exposition au soleil.

Action du spectre. — Il faut d'abord savoir quels sont les rayons qui produisent la phosphorescence, et pour cela on projette un spectre sur des bandes de papier couvertes de sulfure en poudre collé. La *fig.* 622

Fig. 622.



représente ces bandes; la première montre le spectre avec ses raies, et les suivantes reproduisent l'aspect des divers sulfures après que le spectre a agi sur eux. Il n'y a rien jusqu'à la raie G, mais la phosphorescence s'est développée aux endroits qui ont reçu les lumières très-réfrangibles et les rayons ultra-violets : elle se manifeste par des teintes diverses très-belles, qu'on a indiquées sur la figure, ne pouvant les reproduire.

Les rayons de chaleur obscure et ceux qui sont lumineux jusqu'en G n'ont point produit d'effet; ils ne sont pourtant pas inactifs. Si l'on commence par impressionner toute la surface du sulfure par la lumière blanche pendant peu de temps, de manière à la rendre un peu lumineuse dans l'obscurité; qu'ensuite on y projette le spectre, on voit que, remises à l'obscurité, les parties comprises entre A et E ont augmenté d'éclat, puis

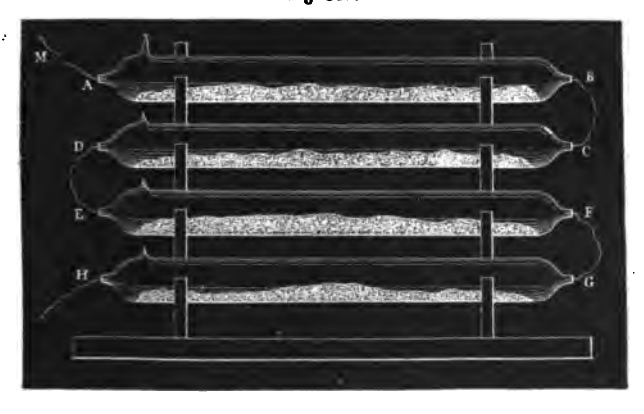
s'éteignent rapidement. Les rayons peu réfrangibles agissent donc; ils agissent comme la chaleur pour activer et précipiter la phosphorescence.

Effet de la lumière composée. — On conçoit maintenant quel doit être l'effet de la lumière blanche; elle contient des rayons ultra-violets qui commencent la phosphorescence, et des rayons calorifiques qui l'activent. Si l'action est prolongée, un équilibre s'établit pendant lequel le corps renvoie, par diffusion une portion des rayons incidents, par phosphorescence ceux qui ont été absorbés et transformés. Quand on éteint les rayons incidents, le premier effet disparaît, le second persiste, absolument comme l'échauffement qui se produit en même temps.

Si en filtrant la lumière à travers l'esculine, le sulfure de carbone, le sulfate de quinine, le verre d'urane, etc., on a éteint tous les rayons ultra-violets, on éteint du même coup la phosphorescence, puisqu'on en supprime la cause. Au contraire, en faisant passer les rayons à travers un verre violet, on ne garde que les radiations actives, et l'effet est augmenté.

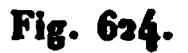
La lumière électrique et celle du magnésium, étant les plus riches en rayons ultra-violets, sont les plus aptes à produire des phosphorescences vives; la meilleure méthode consiste à placer les sulfures dans des tubes vides (*fig.* 623) et à y faire passer la décharge d'induction : ils prennent un éclat considérable.

Fig. 623.



Transformation des rayons. — Il nous reste à caractériser cet effet. On y peut arriver comme il suit : faire tomber un spectre ABC...O (*fig.* 624) sur une bande mince de sulfure, et la regarder à travers un prisme à arêtes horizontales. Chaque rayon diffusé est dévié, le rouge A en A′, le jaune D l'est davantage en D′, le vert E en E′. Jusque là ces rayons se dévient sans

changer de caractère et sans cesser d'être simples, parce qu'ils ne sont que diffusés comme ils le seraient par une feuille de papier. Il n'en est


Fig. 624.



pas de même du violet H; il a pris sur le sulfure une teinte bleuâtre; il se décompose en un spectre tout entier depuis h' jusqu'à H', et l'on y voit toutes les couleurs depuis le rouge jusqu'au violet; il en est de même des rayons ultra-violets. En résumé, la phosphorescence consiste en ceci, qu'un rayon simple très-réfrangible se trouve avoir donné naissance à une infinité de rayons lumineux tous moins réfrangibles que lui.

II. — FLUORESCENCE.

Il y a des gaz phosphorescents; aucun liquide ne l'est, mais certains possèdent une propriété analogue, qu'on pourrait appeler *phosphorescence instantanée*, c'est la *fluorescence*.

Recevons dans la chambre obscure un faisceau solaire ABCD (*fig.* 625) et faisons-le tomber normalement sur la face antérieure BD d'un cristal de fluorine. Nous verrons d'abord qu'il le traverse sans éprouver aucun affai-

blissement apparent, et néanmoins, si nous plaçons l'œil dans le prolongement de la face BD, nous voyons que la couche superficielle BEDF du

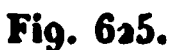
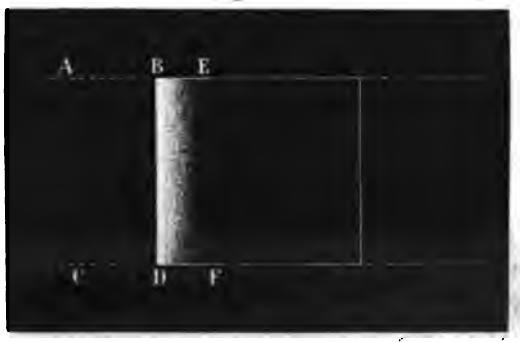


Fig. 625.



cristal est vivement éclairée et qu'elle diffuse dans toutes les directions une lumière dont la teinte change avec l'échantillon. Cette action se produit sur un grand nombre de substances transparentes solides ou liquides, et en particulier sur la fluorine, le verre d'urane; sur les solutions de l'écorce de marronnier d'Inde dans l'eau, du sulfate de quinine dans les acides tartrique ou sulfurique dilués, de la chlorophylle dans l'alcool, etc.

Quand on place à la suite l'une de l'autre deux auges contenant un liquide actif, la première seule manifeste une diffusion, la seconde se com-

Fig. 626.

porte comme l'eau pure. On justifie cette assertion en plongeant dans une

solution de sulfate de quinine un tube EF rempli du même liquide (*fig.* 626), la partie immergée F devient obscure, la portion supérieure E est seule fluorescente. J. Herschel exprimait cette particularité en disant qu'il se fait une diffusion *épipolique*, c'est-à-dire à la surface, et il pensait que les rayons perdant leur propriété après l'avoir une fois exercée, éprouvaient une modification dans leur mode de vibration ; il n'en est rien : la véritable cause de la fluorescence a été découverte par M. Stokes.

Expériences de M. Stokes. — Il reçut dans la chambre obscure un spectre horizontal sur la face O, ANO (*fig.* 627) d'une auge remplie d'un

Fig. 627.



liquide actif, ou sur un verre d'urane. Les rayons calorifiques ne produisirent rien, ni les lumières jusqu'au vert E, mais les rayons très-réfrangibles développèrent le long de la surface, de F en O, et dans une très-petite épaisseur, une lueur fluorescente, où les raies de Frauenhofer étaient marquées par des espaces obscurs, comme elles le sont dans le spectre même. L'illumination commence en F et finit en T, pour l'esculine, le bisulfate de quinine, le verre d'urane ; elle se produit à partir de D, pour le curcuma et le gaïac ; elle correspond aux raies d'absorption pour la teinture de chlorophylle.

Or on se rappelle que ces mêmes substances, qui laissent passer tous les rayons lumineux, absorbent les rayons violets et ultra-violets. Il est donc évident que ces rayons sont la cause de la fluorescence, qu'ils disparaissent après avoir traversé le sulfate de quinine, et avec eux la propriété épipolisante, et qu'enfin ils sont transformés en rayons lumineux.

Pour le démontrer par une épreuve décisive, M. Stokes illumina par le spectre une bande de papier peinte au bisulfate de quinine (*fig.* 624) et il l'a regarda avec un prisme. Il vit alors que chaque teinte de fluorescence, celle du point H par exemple, se décomposait en un spectre complet de

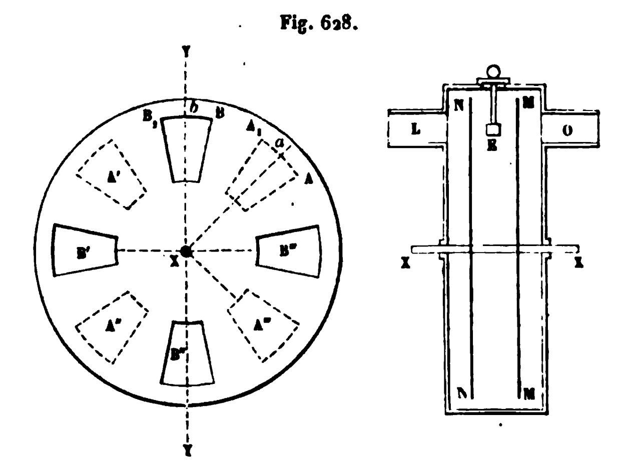
en H′, qui contient toutes les couleurs du rouge au violet. Les choses se passent donc comme pendant la phosphorescence.

Les lumières des lampes ne produisent aucun de ces effets, parce qu'elles ne contiennent point de rayons ultra-violets; mais l'arc électrique, si riche en radiations chimiques, est de toutes les lumières la plus propre à développer la fluorescence, surtout quand elle a passé à travers un verre violet assez épais pour éteindre toutes les lumières de A en G. Si alors on la projette sur un carton blanc où l'on a tracé des dessins avec du sulfate de quinine, on les voit s'illuminer en bleu pâle. On fait encore des expériences très-brillantes avec des tubes de Geissler, en verre d'urane, qui s'illuminent vivement en vert au moment du passage de la décharge électrique. On peut aussi envelopper ces tubes avec des solutions de quinine, de curcuma, etc., qui émettent des rayons bleus ou orangés.

En résumé, le phénomène qui nous occupe est produit par les rayons très-réfrangibles. Ils sont absorbés; ils mettent en vibration l'éther des milieux fluorescents, et ces vibrations se transmettent à distance sous forme de rayons moins réfrangibles. Ce sont précisément les caractères de la phosphorescence; il n'y a qu'une seule différence, c'est la durée. La fluorescence a lieu pendant l'action des rayons excitateurs, elle s'éteint avec eux; la phosphorescence, au contraire, se prolonge et survit à la cause qui la développe.

Phosphoroscope. — Il est probable d'ailleurs que cette différence n'est

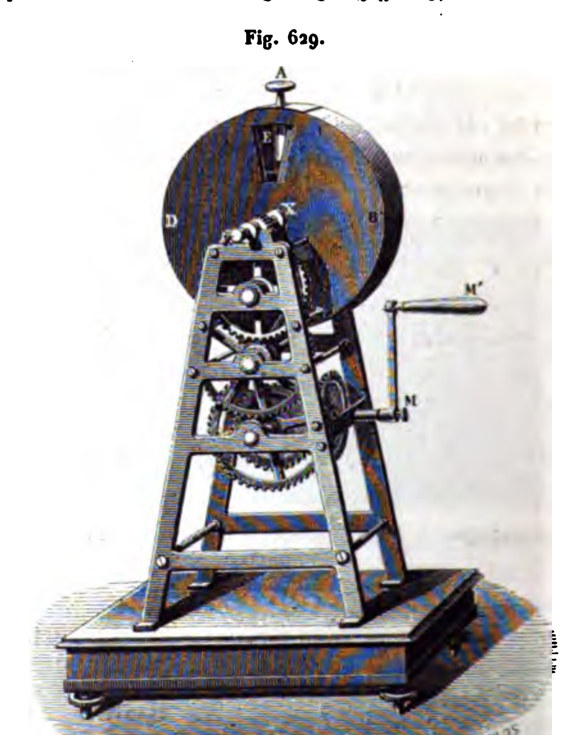
Fig. 628.



point absolue et que la fluorescence dure pendant un temps fini, quoique

très-court. C'est pour étudier ce côté de la question, que M. E. Becquerel a imaginé le *phosphoroscope*. Il se compose de deux disques métalliques noircis, MM et NN (*fig.* 628), fixés sur un axe commun XX, que l'on fait tourner par une manivelle et des engrenages (*fig.* 629). Le tout est enfermé

Fig. 629.



dans une boîte noircie, où la lumière pénètre par le tube L pour arriv à l'œil par le tube O, après avoir traversé les orifices percés dans les de disques. Le disque antérieur a quatre fenêtres A, A', A", A‴; l'autre e autant, B, B', B", B‴; mais ces fenêtres sont croisées, de manière que l' ne peut recevoir aucun rayon directement à travers le système tourna ce n'est que par l'intermédiaire d'un corps fluorescent E, éclairé par l' fice AA_1 et rayonnant ensuite par l'orifice BB_1, que la lumière peut se m nifester à l'œil. Comme l'action se produit quatre fois pendant un tour sensation est continue quand la vitesse est suffisante. En opérant avec instrument, on reconnaît que le spath est phosphorescent pendant un t

de seconde; le verre et le corindon ne le sont que pendant quelques centièmes de seconde. Aucun liquide ne s'illumine dans le phosphoroscope, ce qui prouve que la durée de la fluorescence des liquides est inférieure à $0^s,0001$.

III. — PHOTOCHIMIE.

Il nous reste à étudier une transformation plus remarquable, la transformation des radiations en action chimique, de leur force vive vibratoire en ce genre particulier de travail qui réunit ou sépare les molécules.

Actions réductrices et oxydantes. — Scheele découvrit en 1770 que le chlorure d'argent noircit à la lumière, parce qu'il est décomposé et laisse un dépôt d'argent pulvérulent qui est noir. La lumière réduit de même tous les composés des métaux de la dernière section, les sels de chrome, l'azotate d'urane, les acides azotique et chromique, etc.

Mais les rayons solaires peuvent produire aussi des actions tout opposées, c'est-à-dire oxydantes; ils combinent avec déflagration le chlore et l'hydrogène, oxydent les résines, les gommes, les essences d'amandes amères, de citron, de térébenthine, la benzine, les vernis et la plupart des matières organiques. C'est par une expérience de ce genre, que M. Niepce inaugura l'art de la photographie, en 1813. Il avait déposé sur une plaque d'argent bruni une couche mince de bitume de Judée; puis, appliquant dessus une gravure en taille douce, il l'exposait au soleil. Les rayons pénétraient à travers le papier blanc, mais étaient arrêtés par les traits noirs de la gravure. Le bitume de Judée se conservait sans altération sous ces traits; mais il se combinait avec l'oxygène sous les parties blanches et devenait insoluble dans les essences. Il suffisait alors de laver la plaque avec un mélange d'huiles de lavande et de pétrole pour mettre le métal à nu, avec son aspect noir bruni aux endroits que les traits avaient recouverts, tandis qu'il demeurait voilé par une couche blanche insoluble aux points que la lumière avait impressionnés : on obtenait ainsi une reproduction de la gravure.

La résine de gaïac bleuit en même temps qu'elle absorbe l'oxygène. Si donc on l'étale en couche mince sur une surface, qu'on la couvre d'une gravure, elle prend une teinte foncée sous les blancs et reste blanche sous les noirs; elle donne finalement une image inverse : c'est ce que nous nommons *une épreuve négative*.

Effets superposés. — Or, puisque d'une part certains acides ou sels et certains composés métalliques binaires tendent à se dissocier sous

l'action de la lumière, et que d'un autre côté l'oxygène ou le chlore, le brome et l'iode acquièrent, dans les mêmes conditions, une plus vive affinité pour l'hydrogène des matières organiques, on ajoutera les deux effets en mêlant ces composés métalliques ou salins à ces matières organiques. Ainsi, lorsqu'on expose à la lumière une feuille de papier et une cassure récente de porcelaine, enduites avec la même solution d'azotate d'argent fondu, la porcelaine reste blanche, tandis que le papier noircit, parce que la matière végétale facilite la réduction en s'oxydant.

D'après cela, on prépare des surfaces extrêmement sensibles à l'action de la lumière en étalant des feuilles de papier sur un bain de nitrate d'argent dissous, les y laissant flotter assez longtemps pour que leur surface inférieure soit bien imbibée, et les faisant sécher dans l'obscurité. On augmente encore leur sensibilité en les plongeant ensuite dans des solutions de chlorure, bromure ou iodure de potassium, ce qui transforme l'azotate en chlorure, bromure ou iodure d'argent, substances insolubles décomposables par elles-mêmes, et qui le deviennent davantage étant mêlées à la matière organique du papier. On peut renverser l'ordre des deux immersions, plonger d'abord le papier dans le composé de potassium, ensuite dans le sel d'argent. C'est ainsi qu'on prépare le papier sensible employé dans la photographie.

C'est par la même raison que l'azotate d'urane se décompose dans l'alcool, tandis qu'il résiste à la lumière dans l'eau pure; que le bichromate de potasse et le perchlorure de fer se réduisent dans l'acide tartrique, etc. En résumé, les mélanges formés avec des composés qui tendent à se réduire, et des substances qui tendent à s'oxyder sous l'influence de la lumière, constituent les réactifs les plus sensibles à l'action photochimique.

Actions révélatrices. — Il n'est point nécessaire d'exposer à la lumière les deux éléments d'un pareil mélange; il suffit que l'un d'eux en ait subi l'effet. Ainsi quand on place dans la chambre obscure un papier imprégné d'iodure d'argent et d'acide gallique, le mélange est complet, l'action de la lumière est efficace, et bientôt l'image négative apparaît. Si l'on omet l'acide gallique, l'épreuve ne se montre point. Cependant l'action de la lumière s'est produite et a communiqué au sel d'argent une tendance à la réduction, car si l'on plonge après coup le papier dans l'acide gallique, on voit l'image apparaître subitement. Il en est de même quand on le mouille avec du sulfate de fer ou du protochlorure d'étain, c'est-à-dire avec un corps oxydant. Pour distinguer ces deux actions, on nomme *impressionnable* la matière qui reçoit et conserve l'action de la lumière, et *révélatrice* celle qui développe l'image. Il est à remarquer d'ailleurs que le rôle de sub-

stance impressionnable et de substance révélatrice est réciproque, et qu'à l'intensité près on obtient le même effet en insolant l'une ou l'autre.

La plus curieuse de ces actions est la suivante, observée par Niepce de Saint-Victor.

Il exposa pendant quelque temps aux rayons directs du soleil une feuille de papier blanc, puis il l'introduisit, après l'avoir roulée, dans un tube de fer-blanc qui fut bouché hermétiquement, gardé pendant plusieurs jours et même plusieurs mois. On l'ouvrit ensuite et on en plaça l'ouverture sur un papier sensible; bientôt elle s'y dessina par un cercle noir d'argent réduit. Cette action décomposante augmentait d'activité par la chaleur; elle ne se produisait plus à travers un verre; elle n'avait lieu qu'une seule fois, et pour la renouveler il fallait recommencer l'insolation.

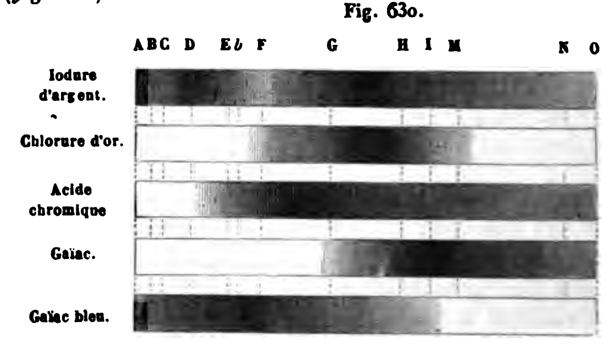
Action sur les vapeurs. — Daguerre a découvert une action révélatrice qui paraît être d'un ordre différent et qui est le fondement de sa méthode photographique (daguerréotypie). Il expose une feuille de plaqué d'argent au-dessus d'un carton imprégné d'iode. Bientôt les vapeurs de cette substance couvrent la plaque d'une couche dont l'épaisseur augmente progressivement, et dont la couleur varie comme celle des anneaux colorés. On arrête l'opération quand la teinte est jaune-orangé, et l'on expose la plaque dans la chambre obscure. On la laisse prendre l'impression pendant dix minutes (aucune image ne se développe), et on l'expose ensuite à la vapeur qu'émet une capsule chauffée pleine de mercure. Cette vapeur s'attache aux points frappés par la lumière et respecte les parties qui étaient restées dans l'obscurité. Pour empêcher toute action ultérieure on dissout l'excès d'iode dans de l'hyposulfite de soude.

Après ces opérations, le métal a gardé son bruni et paraît noir dans les ombres; il est dépoli et blanchi par le mercure dans les lumières, et une image positive se voit quand on regarde la plaque dans une situation telle qu'elle ne réfléchisse spéculairement aucune lumière. MM. Salmon et Garnier ont découvert un autre fait de même nature. Quand on insole une plaque de soufre à travers un carton découpé et qu'on l'expose ensuite aux vapeurs de mercure, elle les retient sur les parties qui ont été éclairées, et noircit en se combinant avec elles. En résumé, outre les actions précédemment étudiées, la lumière donne aux surfaces qu'elle a frappées la propriété d'attirer la vapeur des corps avec lesquels elles ont de l'affinité.

Action des rayons simples. — Pour étudier l'action spéciale de chaque rayon élémentaire, on prépare un papier sensible au chlorure d'argent, dans l'obscurité la plus absolue, et l'on fait tomber sur ce papier un spectre

réel très-pur, obtenu par un prisme et une lentille de quartz. On voit alors le chlorure noircir et les raies se dessiner, L'effet commence en F, il atteint son maximum vers la raie H, et se prolonge en s'affaiblissant jusqu'à l'extrémité ultra-violette; il est nul depuis F jusqu'à la raie A et au delà. Il en est de même, si l'on opère avec des papiers préparés au bromure et à l'iodure d'argent, et en révélant l'image par l'acide gallique (*fig.* 630).

Fig. 630.



Avec le bichromate de potasse l'action commence en E et se termine en N; avec le chlorure d'or, elle s'étend depuis E jusqu'en L. Elle est lente, mais une fois commencée elle se continue dans l'obscurité. L'action réductrice est donc exclusivement déterminée par les rayons très-réfrangibles, que l'on nomme, à cause de cela, *rayons excitateurs*.

Sur le gaïac, le bitume de Judée et les essences, l'action de la lumière est inverse; elle est oxydante au lieu d'être réductrice. Malgré cela, l'expérience prouve que ce sont encore les mêmes rayons chimiques qui agissent. Ainsi le gaïac exposé au spectre commence seulement à bleuir en H, et l'action se continue jusqu'à P.

Il ne faudrait pas croire cependant que les rayons calorifiques et lumineux n'exercent aucune action. Reprenons le papier sensible préparé au chlorure d'argent; mais au lieu de le maintenir à l'obscurité, exposons-le pendant un temps très-court à la lumière ordinaire, ou mieux aux rayons chimiques qui passent à travers un verre bleu, afin de déterminer une impression faible et égale dans toutes ses parties. Après cela, faisons tomber comme précédemment un spectre réel très-pur sur une portion seulement de la feuille. Elle noircira dans toutes les régions du spectre depuis le rouge le plus extrême, et l'on verra se dessiner toutes les raies lumineuses depuis A jusqu'à H. Cette fois les rayons peu réfrangibles ont agi; ils ont continué et développé l'impression commencée par le

rayons chimiques, bien qu'ils soient impuissants à la faire naître. Ils ne l'excitaient pas, ils l'ont continuée, et M. Edm. Becquerel les nomme à cette occasion *rayons continuateurs*. On peut remarquer qu'ils précipitent et révèlent l'action chimique comme ils le faisaient pour la phosphorescence.

Les mêmes rayons n'oxydaient pas le gaïac blanc; mais quand on les fait tomber sur le gaïac qui a absorbé de l'oxygène et qui est bleu, ils dégagent ce gaz et ramènent la substance au blanc. Loin d'être oxydants pour les matières organiques, ils sont réducteurs, et leur action est inverse de l'action des rayons très-réfrangibles.

Héliochromie. — Wollaston, Davy, Seebeck avaient remarqué que le chlorure d'argent prend et garde la couleur des rayons simples qui le frappent. Leurs expériences furent reprises par M. Edm. Becquerel. Il plonge une lame de plaqué d'argent dans de l'acide chlorhydrique étendu, et la fait communiquer avec le pôle positif d'une pile. Elle se couvre aussitôt d'une couche mince de chlorure d'argent qui prend, en augmentant d'épaisseur, les teintes successives des anneaux de Newton. On arrête l'opération quand on a obtenu pour la deuxième fois une couleur violette. On lave et on sèche la plaque; on la polit avec du tripoli fin et on la recuit jusqu'à 100 degrés. Toutes ces opérations doivent être faites dans l'obscurité. On expose enfin la plaque pendant une heure ou deux à l'action d'un spectre solaire réel bien immobilisé par un héliostat, et l'on voit peu à peu naître l'impression. Elle se compose d'abord d'une traînée couleur puce foncée qui précède le rouge, et qui est due aux chaleurs obscures. A l'extrémité opposée du spectre, de H en T, les rayons ultra-violets marquent une trace grisâtre très-prolongée, et enfin les lumières ont peint leurs couleurs respectives entre A et H, avec un maximum d'éclat au point même où le spectre lumineux présente sa plus grande intensité. Le jaune est un peu pâle, mais le rouge, le vert et le violet sont reproduits avec leur propre teinte.

Quand on veut obtenir l'image des objets avec leur couleur propre, il est nécessaire d'enlever les radiations obscures, ce qu'on fait en protégeant la plaque : 1° par une auge pleine d'eau qui éteint les chaleurs obscures, 2° par une couche de sulfate de quinine qui arrête les rayons chimiques. Cela fait, une gravure coloriée se reproduit avec ses blancs, ses noirs et ses enluminures; et même une poupée objective se peint avec ses formes et ses couleurs. On comprend toutes les espérances que ces phénomènes ont fait concevoir. MM. Niepce et Poitevin ont déjà réalisé des progrès importants; mais toutes les tentatives qu'on a faites dans

ce nouvel art de l'héliochromie ont échoué devant l'altération rapide des images.

Action de la lumière sur les feuilles. — Priestley annonça, en 1773, que les plantes ont la propriété de rendre sa pureté à l'air vicié par la respiration des animaux. Ingen-Housz découvrit que cette faculté n'appartient qu'aux parties vertes des végétaux, et qu'elle ne s'exerce que sous l'influence des rayons solaires. Enfin Sennebier expliqua ces effets en démontrant que les feuilles, lorsqu'elles sont exposées au soleil, décomposent l'acide carbonique. Elles dégagent l'oxygène et fixent le carbone, qui entre ainsi dans la constitution du végétal. M. Boussingault trouva, plus tard, que l'eau elle-même est décomposée dans ces conditions, et qu'une portion de son hydrogène se fixe dans la plante.

Cette action des feuilles cesse quand on les pile. Elle s'accomplit avec une telle abondance, qu'une seule feuille de nénuphar abandonne pendant l'été jusqu'à 300 litres d'oxygène. C'est par la face supérieure que les feuilles absorbent l'acide carbonique, tandis que l'oxygène s'échappe par la surface inférieure. La réduction de l'eau et de l'acide carbonique sous l'influence de la lumière est d'ailleurs une réaction tout à fait analogue à la désoxydation du gaïac bleu sous l'influence des rayons peu réfrangibles.

C'est la force vive ainsi empruntée au soleil qui se transforme en effet chimique. C'est ainsi que les plantes créent de la matière organique. Les houilles, les lignites, l'immense provision de bois de nos forêts sont les résidus de ces épurations continues de l'atmosphère, comme l'oxygène de l'air en est le produit.

Les animaux herbivores ou carnivores se nourrissent des matières végétales, les premiers directement, les derniers de seconde main. Cette nourriture, à peine assimilée, se brûle dans les poumons, se transforme en acide carbonique et en eau, qui repassent dans l'atmosphère, et en matières azotées, qui se répandent sur le sol. Enfin les animaux abandonnent de toute nécessité, sous forme de chaleur, la somme de force vive qui avait été empruntée au soleil au moment où s'était constituée la matière organique dont ils se nourrissent.

Les animaux et les végétaux accomplissent trois fonctions correspondantes et inverses qui s'équilibrent et se contre-balancent : les végétaux purifiaient l'air, les animaux le vicient; les premiers composaient des matières, les seconds les détruisent; ceux-là absorbaient de la lumière solaire, ceux-ci la rendent sous forme de chaleur obscure ou de force.

L'homme brûle le bois, les houilles et les lignites; il en retire la chaleur solaire; par les machines à feu, il en tire de la force. On peut ajouter que

le soleil soulève les eaux par l'évaporation, qu'il produit les courants de l'atmosphère, et que l'homme, en demandant la force aux vents, aux chutes d'eau, à la vapeur, aux animaux et à lui-même, ne fait que retrouver et employer la force vive solaire. C'est ainsi que toute chaleur, toute lumière, tout travail, toute force, toute vie végétale ou animale se régénèrent et se transforment, et sont puisées à la source unique et intarissable : le soleil.

IV. — PHOTOGRAPHIE.

C'est entre les années 1813 et 1829 que J. Nicéphore Niepce inventa l'art de copier des gravures sur l'argent poli au moyen du bitume de Judée et par l'action de la lumière. En 1826, il s'était associé Daguerre, qui s'était fait une réputation dans l'art de peindre les dioramas; Daguerre perfectionna d'abord le procédé de Niepce, et inventa le suivant qui porte son nom. Une feuille de plaqué, exposée à la vapeur d'iode jusqu'à devenir jaune, était placée, pendant vingt minutes, au foyer d'une chambre obscure, puis soumise à la vapeur du mercure chauffé jusqu'à 80 degrés. Cette vapeur se portait sur les parties qui avaient subi l'action de la lumière; elle y adhérait et couvrait la plaque d'un voile blanc qui dessinait l'image. On lavait ensuite à l'hyposulfite de soude pour dissoudre l'excès d'iode. Le mercure adhérant très-peu à la plaque, les images manquaient de solidité. M. Fizeau les fixa en faisant chauffer sur la plaque un mélange de chlorure d'or et d'hyposulfite de soude qui laisse déposer un vernis solide d'or métallique. D'un autre côté, M. Claudet trouva, en 1841, qu'en ajoutant du brome à l'iode on augmentait la sensibilité de la plaque, ce qui permit de faire des portraits, en réduisant à deux ou trois minutes la durée de l'exposition à la lumière.

Mais cet art nouveau fut abandonné presque aussitôt que découvert. Une méthode rivale très-supérieure s'était développée en même temps et parallèlement. M. Talbot, qui ignorait les travaux de ses devanciers, l'avait inventée de 1834 à 1839. Il impressionnait dans la chambre obscure une feuille de papier imprégnée de chlorure d'argent, ce qui donnait une image négative; puis il la plaçait sur une seconde feuille de papier sensible qu'il exposait au soleil. Une image nouvelle se formait, inverse de la première, c'est-à-dire *positive*. Cette méthode a été perfectionnée par un nombre considérable de savants et d'artistes. Voici, en quelques mots, comment elle est pratiquée aujourd'hui.

On dissout 1 gramme de poudre-coton dans 90 grammes d'éther et

60 grammes d'alcool à 33 degrés. On y mêle de l'iodure de potassium et quelquefois des substances très-variables destinées à augmenter la sensibilité. On verse ce liquide sur une plaque de verre bien nettoyée. Il s'y étale, et, en s'évaporant, il y laisse un voile de collodion adhérent. Avant qu'il soit sec, on plonge la lame dans un bain d'azotate d'argent (4 grammes d'azotate, 60 grammes d'eau). La couche change d'aspect et devient laiteuse; elle est alors imprégnée d'iodure d'argent. On l'expose à la chambre obscure. Pour révéler l'image, on couvre la plaque d'acide pyrogallique, et pour empêcher l'altération ultérieure, on la laisse digérer dans l'hyposulfite de soude.

Cette image est *négative*. Pour tirer les épreuves définitives, on applique la première sur du papier sensible sec au chlorure d'argent. On presse fortement entre deux verres, et on expose le tout au soleil. L'image se forme rapidement; elle est positive, et il suffit de laver à l'hyposulfite de soude.

CHAPITRE IX.

LES INTERFÉRENCES.

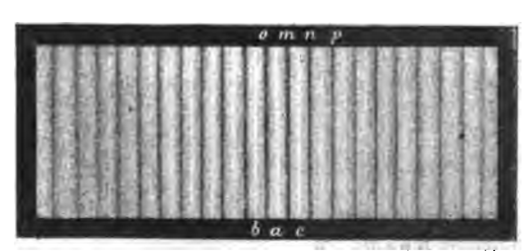
I. — PRINCIPE DES INTERFÉRENCES.

Expérience des deux miroirs. — Soit L (*fig.* 632, p. 628) une fente à bords métalliques verticaux et très-serrés, servant à introduire les rayons solaires dans une chambre obscure. Il est toujours permis de considérer ces rayons comme partant de la fente L elle-même, et de regarder celle-ci comme un luminaire linéaire et vertical.

Deux faisceaux très-voisins, LMO, LON, partant de L, rencontrent deux miroirs MO, ON qui font un angle très-voisin de 180 degrés; ils se superposent après la réflexion, et se trouvent dans les mêmes conditions physiques que s'ils partaient des deux images A et B. Dès lors on peut dire que l'expérience revient à avoir disposé deux lignes lumineuses très-voisines, A et B, qui sont dans un état vibratoire commun, puisqu'elles ont une origine commune, et qui envoient à la fois de la lumière sur un écran FG. Quel est l'effet produit sur cet écran?

Si la lumière a été rendue homogène par l'interposition d'un verre rouge, on voit en C, perpendiculairement au plan de la figure, en *a* (*fig.* 631),

Fig. 631.



une bande brillante, suivie à droite et à gauche de deux séries symétriques de franges alternativement obscures et brillantes. Si, au lieu d'être rouge, la lumière était jaune, les bandes, tout en conservant les mêmes

40.



Fig. 632.

dispositions, seraient plus étroites; elles le seront d'autant plus que la réfrangibilité sera plus grande. L'effet produit par la lumière blanche est la superposition de ceux que détermine individuellement chacun de ses éléments, et l'on voit des bandes colorées dont la dispersion est d'autant plus grande qu'elles s'éloignent plus du milieu E, et qui finissent par dégénérer en une teinte blanche uniforme.

Ces franges ne se forment point si l'on supprime un des deux faisceaux venant de A ou de B, soit par un écran interposé dans LOM ou dans LON, soit en couvrant l'un des miroirs de noir de fumée, soit en le supprimant. C'est donc la superposition des deux faisceaux qui produit en certains points de la lumière, en certains autres de l'obscurité. On dit qu'ils *interfèrent*, et les franges que nous venons de décrire constituent le *phénomène des interférences*.

Lois du phénomène. — Soient A et B (*fig.* 633) les deux images qui émettent les rayons, OX la perpendiculaire élevée sur le milieu AB de la ligne qui les joint. En O les distances aux points A et B sont égales; elles diffèrent de plus en plus à mesure qu'on s'éloigne en M, N, P. Or Fresnel a prouvé que la formation des franges ne dépend que de la différence des distances du point considéré à A et à B, qu'il y a lumière quand cette différence est

$$o, \quad 2\frac{\lambda}{2}, \quad 4\frac{\lambda}{2}, \quad 6\frac{\lambda}{2}, \ldots;$$

et obscurité quand elle devient

$$\frac{\lambda}{2},\quad 3\frac{\lambda}{2},\quad 5\frac{\lambda}{2},\ldots.$$

On désigne par λ une quantité très-petite qui change d'une couleur à l'autre et qui diminue quand la réfrangibilité augmente; les valeurs de λ sont

	λ.	N.
	mm	
Rouge................	0,000620	497
Orangé................	0,000583	528
Jaune................	0,000551	529
Vert................	0,000512	601
Bleu................	0,000475	648
Indigo................	0,000449	686
Violet................	0,000423	728

Ce phénomène est général, et il se produit toutes les fois qu'on a dédoublé une fente lumineuse en deux autres qui envoient leur lumière à la

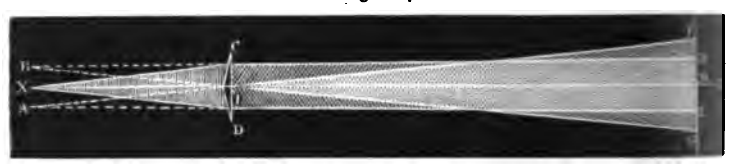
Fig. 633.

fois sur un écran. On le montre par un grand nombre d'expériences, parmi lesquelles nous citerons les suivantes.

Divers moyens de produire l'interférence. — I. Pouillet fit construire un double prisme ODC dont les angles C et D, très-petits, sont égaux entre eux, et il éclaira cet appareil par une fente mince X parallèle à ses arêtes (*fig.* 634). La réfraction donne deux images virtuelles A et B, et les rayons qui ont traversé les deux prismes sont dans les mêmes

conditions que s'ils venaient originairement de ces foyers. De plus, ils se superposent en EH sur l'écran; aussi voit-on un système de franges se

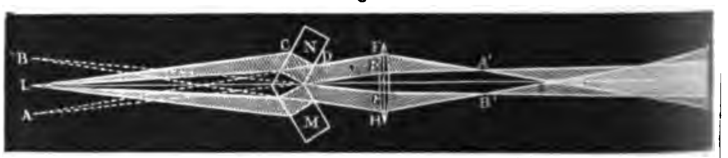
Fig. 634.



produire, et si l'on mesure, comme précédemment, la place des franges et la différence des distances aux origines A et B, on retrouve les mêmes lois qu'avec les miroirs de Fresnel.

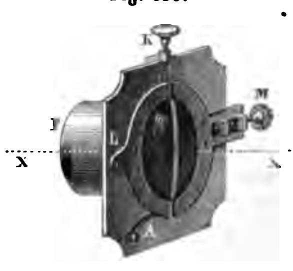
II. Prenons (*fig.* 635) deux morceaux M et N d'une même glace à faces parallèles, formant entre eux un angle très-petit, et recevant la lumière

Fig. 635.



partie d'une fente I située sur la bissectrice de leur angle. Les rayons tels que IC se réfracteront en CD, et sortiront suivant DF parallèlement à leur direction primitive; ils seront dans les mêmes conditions que s'ils partaient d'un foyer A, et constitueront un faisceau divergent EAF. La deuxième glace fournira un second faisceau HBG partant d'un point symétrique B. La fente originelle est ainsi dédoublée en deux images identiques; mais les faisceaux qui en partent ne se superposant point, il n'y a pas de franges. Vient-on à les recevoir sur une lentille FH, ils donnent deux images A' et B', après lesquelles ils se superposent et interfèrent.

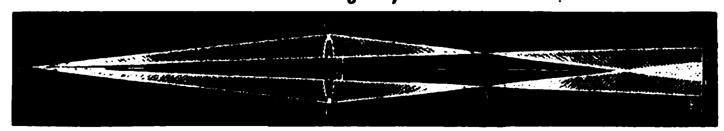
Fig. 636.



III. M. Billet reçoit la lumière provenant d'une fente étroite sur les deux moitiés d'une lentille coupée en deux (*fig.* 636). Le point lumineux L (*fig.* 637) donne deux images B et A situées sur l'axe optique qui a été séparé

deux lignes LDB, LD'B; et les rayons, continuant leur route, se superposent sur l'écran EH, où ils donnent des franges.

Fig. 637.



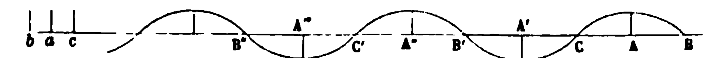
En résumant ces divers exemples, on peut énoncer d'une manière générale le principe suivant : « Quand deux lumières partant d'un même point se superposent après avoir parcouru des chemins divers, elles donnent de l'obscurité ou un redoublement de lumière, si la différence des chemins parcourus est égale à un multiple impair ou pair de $\frac{\lambda}{2}$, λ étant une longueur très-petite qui a été mesurée pour les diverses couleurs. »

Théorie des ondulations. — L'analogie de ces phénomènes avec ceux de l'acoustique est évidente. Il faut chercher à les expliquer par le même mécanisme. Pour établir la théorie de l'optique, on fait une hypothèse : on suppose qu'un fluide lumineux, qu'on nomme *éther*, est répandu dans toute la nature; qu'il a dans les divers milieux des densités différentes, qu'il est élastique, et que ses molécules exécutent et transmettent des vibrations très-rapides comme les molécules pondérables exécutent et transmettent les vibrations sonores.

Il n'y a qu'à répéter ici ce que nous avons exposé en acoustique :

1° Un mouvement vibratoire régulier, dont la durée est T, se transmet dans une direction B"B'B. A un moment donné, il est figuré par une courbe sinusoïdale (*fig.* 638).

Fig. 638.



2° Cette courbe se déplace avec le temps. Pendant une durée T, le point B' se transporte en B, et B a accompli une vibration entière.

3° La vitesse de transmission est a; l'espace BB' est parcouru pendant T : c'est une longueur d'onde; on la représente par λ, et on a

$$\lambda = aT.$$

4° Si N est le nombre des vibrations pendant une seconde,

$$T = \frac{1}{N}, \qquad \lambda = \frac{a}{N}, \qquad a = n\lambda.$$

Explication des interférences. — Ces principes expliquent les interférences. Considérons deux points lumineux A et B concordants (*fig.* 633). S'ils envoient deux mouvements vibratoires en M et que les distances parcourues soient les mêmes, les deux vitesses vibratoires sont égales et s'ajoutent. Il en est de même si les distances de M à A et à B diffèrent d'un multiple pair de $\frac{\lambda}{2}$. Dans ce cas, il y aura aux points tels que M un redoublement de lumière.

Au contraire, les vitesses envoyées en M seront opposées et se détruiront, si la différence des distances parcourues est égale à un multiple impair de $\frac{\lambda}{2}$, et les deux lumières superposées produiront de l'obscurité.

Les longueurs d'onde sont représentées par les valeurs de λ mesurées précédemment; elles diminuent du rouge au violet.

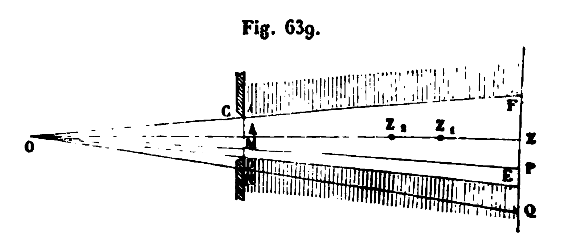
Le nombre des vibrations N effectuées pendant une seconde est égal à $\frac{a}{\lambda}$. a est la vitesse de la lumière, λ est connu; on peut calculer N. On trouve 497 milliards pour le rouge et 728 pour le violet. Le rouge est assimilable aux notes graves, le violet aux sons aigus.

II. — DIFFRACTION.

Quand la lumière rase le bord d'écrans opaques, elle produit des phénomènes variés qu'on explique par les interférences. Nous considérerons deux cas.

Fente étroite. — Soit une ouverture étroite et linéaire CD (*fig.* 639)

Fig. 639.



éclairée par une fente O, elle devrait envoyer sur l'écran de la lumière limitée par OCF, ODE; mais le phénomène est plus compliqué. Soit A le

milieu de CD; décomposons AD en deux moitiés. Si, pour un point Z, on a

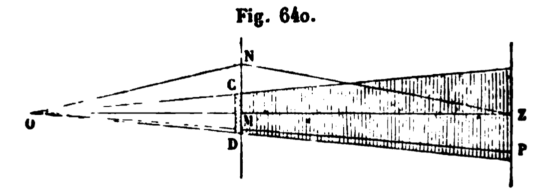
$$DZ - MZ = MZ - AZ = \frac{\lambda}{2},$$

les arcs DM, AM enverront des lumières qui se détruiront par interférence, et il y aura de l'obscurité en Z au milieu de l'espace qui devrait être éclairé.

Aux points de l'écran P, Q,... les arcs AC et AD envoient également des lumières qui diffèrent de route. Si, pour le point P, le retard relatif est égal à un multiple impair de $\frac{\lambda}{2}$, il y a de l'obscurité; on voit de la lumière en Q, si ce retard est un multiple pair de cette même quantité $\frac{\lambda}{2}$.

Ombre d'un cheveu. — Prenons maintenant un corps étroit, un cheveu, dont la section est CD (*fig.* 640). Éclairé par O, il doit projeter une

Fig. 640.



ombre; mais il est clair que les lumières envoyées par les points qui sont au-dessus de C ou au-dessous de D doivent concorder en Z et y faire de la lumière, ce qui a lieu en effet. On remarque dans l'ombre une frange centrale blanche accompagnée des deux côtés de bandes alternativement obscures et brillantes.

III. — ANNEAUX COLORÉS.

Toutes les substances sont transparentes quand elles sont très-minces, et toutes offrent alors des couleurs fort vives. Les bulles de savon en sont l'exemple le plus remarquable. Nous allons chercher la loi de cette coloration dans le cas seulement de l'incidence normale.

Pour produire un phénomène régulier, Newton a imaginé de poser une lentille convexe de grand rayon sur un plan de verre. Elle le touche en un seul point, à partir duquel elle en est séparée par une lame d'air d'autant plus épaisse qu'elle est plus éloignée du contact. Voici ce que l'on observe :

1° En recevant sur le double verre un faisceau de lumière homogène fourni par la combustion de l'alcool salé, on voit par réflexion une tache noire centrale entourée d'anneaux concentriques alternativement brillants et obscurs, qui se serrent de plus en plus à mesure que leur numéro d'ordre augmente.

2° Si l'on emploie successivement diverses lumières simples, les diamètres augmentent ou diminuent en même temps que la longueur d'ondulation ; d'où il suit qu'avec la lumière blanche les anneaux des diverses couleurs ne se superposent point, que l'ensemble est coloré, et que, pour les ordres les plus élevés, le mélange des teintes reproduit une lumière sensiblement blanche et d'égale intensité.

3° Newton a décrit exactement les teintes successives. Après la tache noire centrale et en s'écartant du centre, on voit un premier ordre d'anneaux comprenant le bleu, le blanc, le jaune et le rouge ; le premier peu apparent, les deux autres plus abondants et occupant quatre ou cinq fois l'étendue du bleu.

Le second ordre comprend le violet, le bleu, le vert, le jaune et le rouge ; toutes ces couleurs sont abondantes et vives, excepté le vert.

Dans le troisième ordre, le plus remarquable par l'éclat et l'abondance des teintes, on distingue le pourpre, le bleu, le vert, le jaune et le rouge.

La quatrième série ne contient plus que le vert et le rouge, et les suivantes deviennent de plus en plus indécises. L'ensemble de ces anneaux reproduit exactement les successions de couleurs que nous avons déjà trouvées dans les bandes d'interférence.

4° Par réfraction, l'appareil montre un autre système d'anneaux. Les anneaux transmis, beaucoup plus pâles, parce qu'ils sont noyés dans de la lumière blanche. Leur centre est blanc, et, en général, ils sont inverses des anneaux réfléchis, c'est-à-dire que les noirs prennent la place des blancs et réciproquement.

Pour trouver les lois du phénomène, il faut commencer par mesurer l'épaisseur BC ou c de la lame d'air au contour de chaque anneau AB (*fig.* 641). Soit $AB = d$ le diamètre de cet anneau ; $\frac{d}{2}$ ou DB est moyenne proportionnelle entre les deux sections c et $2R - c$ du diamètre de la sphère à laquelle appartient la lentille

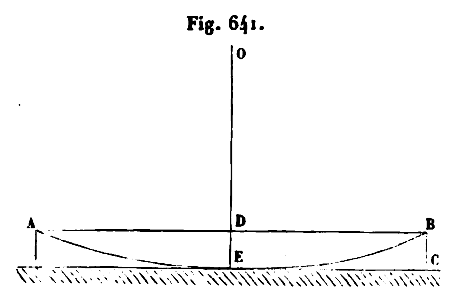
$$\frac{d^2}{4} = (2R - c)c,$$

d'où approximativement

$$c = \frac{d^2}{8R}.$$

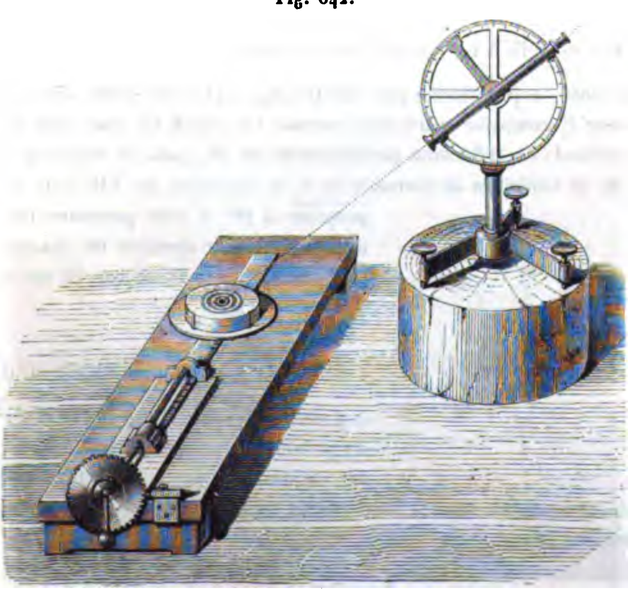
Le rayon R se trouvera au moyen du sphéromètre. Pour mesurer *d*, Newton plaçait l'œil sur la verticale EO, et appliquait en A et en B les

Fig. 641.



deux pointes d'un compas dont il mesurait ensuite l'écartement sur une règle divisée. Le meilleur de tous les procédés est celui de MM. de la Provostaye et Desains (*fig.* 642), qui consiste à placer horizontalement le

Fig. 642.



système des deux verres sur une machine à diviser, à recevoir les rayons réfléchis dans la lunette d'un théodolite, et à faire mouvoir la vis pour

amener successivement les bords extrêmes de chaque anneau en coïncidence avec le fil vertical du réticule. La course de la machine donne le diamètre de l'anneau sous l'inclinaison i qu'on a donnée à la lunette. Voici la loi du phénomène.

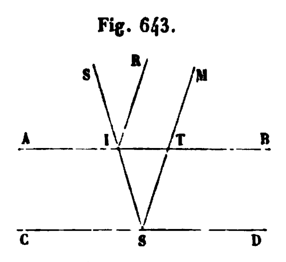
Sous l'incidence normale, les épaisseurs des anneaux obscurs sont égales aux multiples pairs successifs de $\frac{\lambda}{4}$ ou à $2m\frac{\lambda}{4}$, celles des anneaux brillants aux multiples impairs de la même quantité, ou en général à $(2m+1)\frac{\lambda}{4}$.

Théorie. — Pour expliquer les anneaux colorés, il faut d'abord se rappeler la théorie que nous avons donnée de la réflexion en acoustique. Nous avons montré que la vitesse de vibration du rayon conserve son signe ou prend un signe contraire quand il se réfléchit sur un milieu moins dense ou plus dense. D'après cela, Young a admis qu'il y avait changement de signe quand la lumière se réfléchissait, de l'air sur le verre, et qu'il n'y en avait pas dans le cas contraire.

Or il faut se rappeler qu'une vibration change de signe à chaque demi-longueur d'onde, et par conséquent que tout changement dans son signe peut être assimilé à un retard $\frac{\lambda}{2}$ dans sa marche.

Cela posé, représentons par ABCD (*fig.* 643) une lame mince d'une épaisseur E comprise entre deux verres. Un rayon SI, que nous supposons normal, se réfléchira partiellement en IR, puis se réfractera suivant IS, se réfléchira de nouveau en S, et émergera en TM pour se superposer à IR; il aura parcouru un chemin égal à $2e$ et éprouvé un changement de signe; il aura donc sur IR un retard égal à $2e+\frac{\lambda}{2}$.

Fig. 643.



Si ce retard est un multiple impair de $\frac{\lambda}{2}$, il y aura destruction par interférence des deux lumières et un anneau obscur; s'il est un multiple pair, la clarté sera augmentée et l'anneau sera brillant. Dans les deux cas, les conditions sont conformes à l'expérience, comme il suit:

Anneaux obscurs

$$2e+\frac{\lambda}{2}=(2n+1)\frac{\lambda}{2}, \quad e=2n\frac{\lambda}{4}.$$

Les épaisseurs des anneaux successifs sont

$$0, \quad 2\frac{\lambda}{4}, \quad 4\frac{\lambda}{4}, \quad 6\frac{\lambda}{4}, \ldots;$$

elles sont égales aux multiples pairs de $\frac{\lambda}{4}$. Le centre est noir.

Anneaux brillants

$$2e + \frac{\lambda}{2} = 2n\frac{\lambda}{2}, \quad e = (2n-1)\frac{\lambda}{4}.$$

Les épaisseurs des anneaux successifs sont

$$3\frac{\lambda}{4}, \quad 5\frac{\lambda}{4}, \quad 7\frac{\lambda}{4}, \ldots;$$

elles sont égales aux multiples impairs de $\frac{\lambda}{4}$.

CHAPITRE X.

POLARISATION ET DIRECTION DES VIBRATIONS.

I. — PROPRIÉTÉS DES RAYONS POLARISÉS.

Double réfraction. — Vers le milieu du XVIIe siècle, un savant médecin danois, Érasme Bartholin, découvrit que l'on voit une double image des objets quand on les regarde à travers une lame de spath d'Islande. Ce minéral cristallise dans la forme rhomboédrique. Qu'on se figure un parallélépipède MPQM'P'Q' (*fig.* 644) formé par six losanges égaux entre eux. Les trois premiers se rencontrent en O par leurs angles obtus, qui sont égaux à 101°, 55, et ils font entre eux des angles dièdres égaux à 105°, 5. Les trois derniers se rencontrent dans les mêmes conditions en O'.

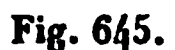
Fig. 644.

O et O' sont les deux sommets du rhomboèdre; la ligne OO' qui les joint est l'axe du cristal; elle fait un angle de 45° 22' avec les six faces qui y aboutissent et de 63° 45' avec les six arêtes.

Si par l'axe OO' on mène un plan MOM' normal à une face PM'Q' du cristal, il passera par les arêtes O'M et O'M'; cette section, ou toute autre section parallèle menée par un point quelconque de la face P'MQ' est dite *section principale* du cristal. Elle a la forme d'un parallélogramme MOM'O' dont les angles O, O' sont égaux à 109° 8'; l'axe OO' fait avec l'arête OM un angle de 45° 22'.

Cela posé, faisons arriver les rayons solaires par une petite ouverture située en L (*fig.* 645, n° 1); mettons une lentille en M' et un écran en L', réglé de telle sorte que les rayons partis de L fassent un foyer en L'. Interposons maintenant entre le point L et la lentille un rhomboèdre de verre, de manière que sa section principale SS soit dans le plan du tableau. Le faisceau de lumière LA se réfractera en AA', et les rayons émergents seront

dans les mêmes conditions que s'ils partaient d'un point *o*. Par suite, l'image sur l'écran sera en O sur la ligne qui joint *o* avec le centre optique C, prolongée jusqu'en O.



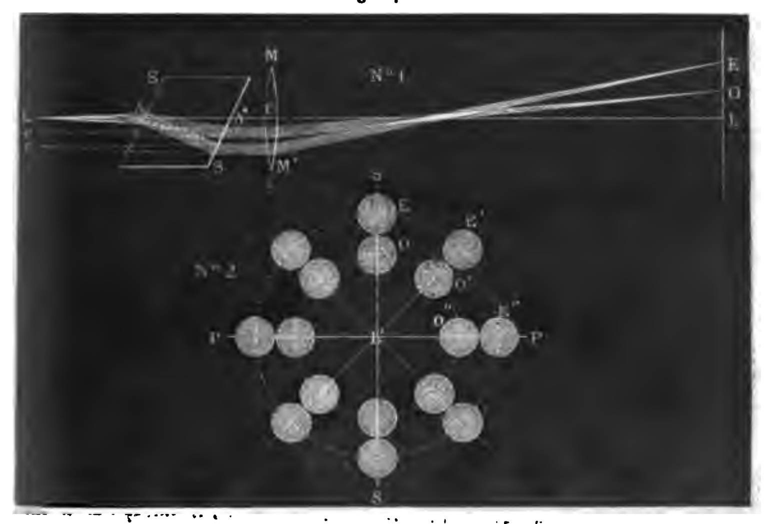


Fig. 645.

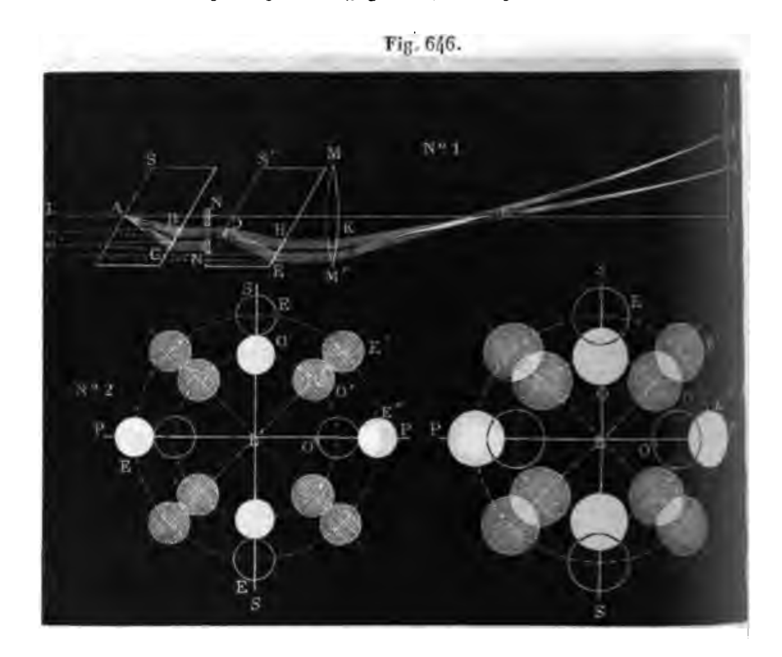
Un rhomboèdre de spath se conduira absolument de la même manière; il donnera une image O qu'on nomme *image ordinaire;* mais il exercera une action de plus. Le faisceau incident LA non-seulement se réfractera en AA', mais il donnera un deuxième système de rayons AS qui s'écarteront des premiers dans le cristal, et reprendront leurs directions primitives en sortant; ils seront dans les mêmes conditions que s'ils venaient d'une ouverture *e*, et ils feront en E, sur la ligne *e*C prolongée, une image réelle qu'on nomme *image extraordinaire*.

Ces deux images, l'une en O peu déviée, l'autre en E qui l'est davantage, sont dans la section principale; et si l'on fait tourner celle-ci, elles tournent autour du point L' et prennent, quand cette section fait avec le plan vertical des angles de 0, 45, 90, 135, 180, 225, 270, 360 degrés, les dispositions présentées dans la *fig.* 645, n° 2.

Il y a maintenant deux questions à traiter : 1° il y a à chercher si la lumière qui forme les deux images O et E possède les mêmes propriétés physiques que la lumière incidente, ou si elle a subi des modifications; 2° il y a à étudier les lois de la réfraction des deux images. Commençons par la première.

Polarisation du rayon ordinaire. — Recevons les rayons émanés d'une ouverture circulaire très-petite L sur un premier rhomboèdre fixe dont la section principale SC (*fig.* 646) sera, par exemple, verticale; puis,

Fig. 646.



interceptant le faisceau extraordinaire par un écran MN, nous laissons passer les rayons ordinaires BD qui seront dans les mêmes conditions que s'ils étaient envoyés par une ouverture *o*. Nous les réfracterons ensuite à travers un second rhomboèdre S'E, et nous ferons avec cette lumière, qui a subi une première réfraction ordinaire, les mêmes expériences que précédemment avec la lumière naturelle. Comme précédemment, nous aurons sur l'écran deux images, l'une ordinaire O', l'autre extraordinaire E'; elles seront encore dans la section principale du second cristal et prendront les mêmes positions que dans la *fig.* 645, n° 2; seulement leurs intensités varieront avec l'angle α que fait la seconde section principale avec la première, c'est-à-dire avec le plan vertical. L'aspect de ces images est représenté (*fig.* 646, n° 2).

Quand cet angle α est nul, l'image extraordinaire E a disparu. Elle augmente peu à peu d'intensité quand l'angle croît, mais en même temps l'image ordinaire diminue. A 45 degrés, les deux images O' et E' sont

égales; à 90 degrés, les mêmes variations d'intensité se continuant, l'image ordinaire O″ est devenue nulle, et l'extraordinaire E″ maxima.

La rotation se poursuivant de 90 à 180 degrés, les intensités repasseront par les mêmes valeurs que de 90 degrés à zéro; et enfin, si l'on va de 180 à 360 degrés, les images reprendront les mêmes éclats que de 180 degrés à zéro.

Les expériences se font en mettant l'un après l'autre les deux rhomboèdres B et A (*fig.* 647), et en faisant tourner le second par le bouton C.

Fig. 647.



1° La première conséquence à tirer de cette remarquable expérience est que la lumière du rayon ordinaire fourni par le premier cristal n'est pas constituée comme la lumière naturelle, puisque celle-ci donne à travers un rhomboèdre des images toujours égales en intensité, et celle-là des images variables avec l'angle α des deux sections. On dit que cette lumière est *polarisée*.

2° Chacune des deux images offre la même intensité quand la section principale du deuxième rhomboèdre occupe deux positions symétriques par rapport au plan vertical SS ou au plan horizontal PP, qui sont le premier parallèle, le second perpendiculaire à la section principale SS du pre-

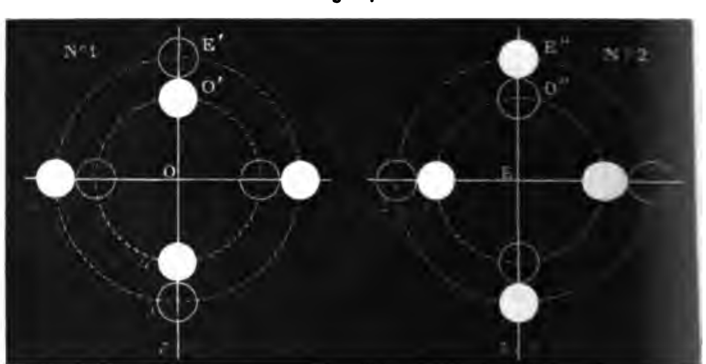
mier rhomboèdre. Pour fixer cette symétrie par un mot, on dit que le rayon ordinaire O est polarisé dans cette section principale SS; cela veut dire simplement que, la deuxième section principale étant placée dans ce plan, l'image extraordinaire est nulle.

Loi de Malus. — Prenons comme unité l'intensité du rayon LA. Le faisceau ordinaire O sorti du premier cristal est $\frac{1}{2}$. Il se divise en deux autres à travers le deuxième spath, l'un O', l'autre E'. Malus a prouvé que leurs intensités sont

$$O' = \frac{1}{2}\cos^2\alpha, \quad E' = \frac{1}{2}\sin^2\alpha.$$

Polarisation du rayon extraordinaire. — En déplaçant l'écran MN (*fig.* 646), on peut intercepter le rayon ordinaire BD, laisser passer le faisceau extraordinaire CN et étudier sa réfraction à travers le second rhomboèdre S'E. On trouve que la lumière qui le compose n'est plus de la lumière naturelle, qu'elle a éprouvé les mêmes modifications que celle du faisceau ordinaire, qu'elle est polarisée; seulement elle est polarisée

Fig. 648.



dans le plan horizontal perpendiculaire à la section principale SC, et les intensités du rayon ordinaire O″ et du rayon extraordinaire E″ sont

$$O'' = \frac{1}{2}\sin^2\alpha, \quad E'' = \frac{1}{2}\cos^2\alpha.$$

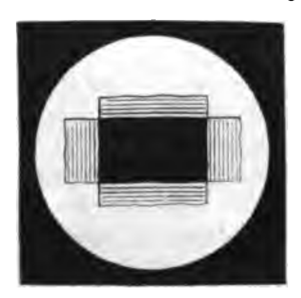
L'aspect de ces quatre images O', E', O″, E″ est résumé dans la *fig.* 648, et voici le tableau des intensités :

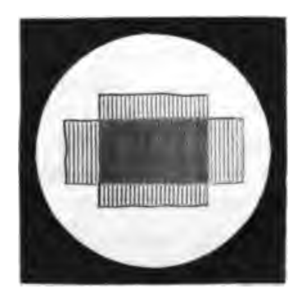
Rayon naturel.	À travers le premier cristal.	À travers le second cristal.	Plan de polarisation.	Somme	
I.......	$O = \frac{1}{2}$	$E' = \frac{1}{2}\sin^2\alpha$	α	$\frac{1}{2}$	I
		$O' = \frac{1}{2}\cos^2\alpha$	$90 - \alpha$		
	$E = \frac{1}{2}$	$O'' = \frac{1}{2}\sin^2\alpha$	α	$\frac{1}{2}$	
		$E'' = \frac{1}{2}\cos^2\alpha$	$90 - \alpha$		

Quand on n'intercepte aucun des deux rayons ordinaire ou extraordinaire sortis du premier cristal, on voit sur l'écran se peindre les images O', O", E', E", et y prendre les intensités exprimées dans le tableau précédent.

Tourmaline. — Parmi les cristaux à un axe, la tourmaline offre une particularité remarquable : elle est colorée, absorbe une portion de la

Fig. 649.





lumière, mais surtout celle du rayon ordinaire; de sorte que, prise sous une épaisseur convenable, elle ne laisse passer que le rayon extraordinaire. Deux tourmalines superposées ne transmettent que le rayon E":

$$E'' = \frac{1}{2}\cos^2\alpha.$$

Il est maximum si $\alpha = 0$, nul si $\alpha = 90°$. L'expérience offre l'aspect dessiné (*fig.* 649).

II. — DIRECTION DES VIBRATIONS LUMINEUSES.

Les interférences nous ont appris que la lumière est constituée par des vibrations; elles nous ont fait connaître la durée de ces vibrations et leur

longueur d'onde, mais elles ne peuvent nous renseigner sur leur direction.

Il se pourrait que ces vibrations fussent longitudinales, comme celles des tuyaux sonores; ou bien transversales, comme celles qui se propagent à la surface de l'eau. Les propriétés du rayon polarisé vont résoudre cette question.

Un rayon ordinaire sorti d'un premier cristal dont la section principale est verticale arrive en O perpendiculairement au plan du tableau (*fig.* 648). Si sa vibration se faisait longitudinalement dans le sens même de sa propagation, il aurait les mêmes propriétés dans le sens vertical ou horizontal. L'expérience prouve qu'il n'en est pas ainsi, et qu'en le recevant sur un deuxième cristal dont la section est verticale ou horizontale, il offre les images ordinaire et extraordinaire que la figure représente.

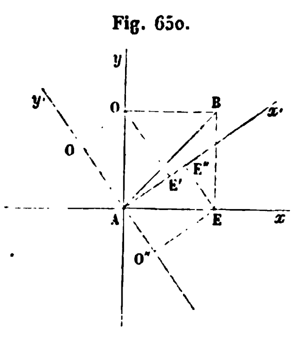
Ces propriétés s'expliquent au contraire si l'on admet que les vibrations du rayon O sont *transversales*, c'est-à-dire perpendiculaires à sa propagation, et dirigées soit dans le plan vertical, soit dans le plan horizontal, dans le plan de polarisation ou dans un plan perpendiculaire.

Le rayon extraordinaire qui arrive en E (*fig.* 648, n° 2) offre les mêmes particularités, avec cette différence que les deux images changent de rôle. Il faut donc que ses vibrations soient également normales à sa direction et perpendiculaires aux vibrations du rayon ordinaire.

Fresnel a prouvé par d'autres expériences que, dans ces deux rayons, les vibrations étaient dirigées perpendiculairement au plan de la polarisation. Admettant cette conclusion, tout s'explique comme il suit.

Un rayon de lumière naturelle se compose de vibrations transversales mais situées tantôt dans le plan Ax (*fig.* 650), tantôt dans AB, etc., sans aucune régularité. En passant dans un premier cristal dont la section principale est Ax, chaque vibration AB se décompose en deux autres : l'une AE suivant Ax, l'autre suivant Ay; et, comme la direction de AB change à chaque moment, les sommes des composantes suivant Ax et Ay sont égales au bout d'un temps suffisant, et le rayon naturel dont l'intensité était égale à l'unité est remplacé par deux autres vibrations d'intensité moitié moindre, situées suivant AO et AE : la première est le rayon ordinaire, la seconde l'extraordinaire.

Fig. 650.



Considérons le premier et faisons-le tomber sur un second cristal dont

la section Ax' fait un angle α avec Ax. AO se décomposera de même en deux, AO' et AE'; on aura

$$AO' = AO \cos\alpha,$$
$$AE' = AO \sin\alpha.$$

Les lignes AO' et AE' expriment les vitesses vibratoires à un moment donné. Or les intensités de la lumière doivent être égales aux forces vives des molécules d'éther, c'est-à-dire proportionnelles aux carrés des vitesses AO' et AE'; elles seront pour les deux rayons

$$\overline{AO'}^2 = O' = \tfrac{1}{2}\cos^2\alpha,$$
$$\overline{AE'}^2 = E' = \tfrac{1}{2}\sin^2\alpha;$$

de même AE se décomposera en deux autres rayons qui auront les intensités suivantes :

$$\overline{AO''}^2 = O'' = \tfrac{1}{2}\sin^2\alpha,$$
$$\overline{AE''}^2 = E'' = \tfrac{1}{2}\cos^2\alpha.$$

En résumé, il est acquis que les vibrations sont transversales, perpendiculaires au plan de polarisation, et qu'un cristal les décompose en vibrations parallèles et perpendiculaires à sa section principale, suivant la loi du parallélogramme des vitesses.

III. — RÉFLEXION ET RÉFRACTION DE LA LUMIÈRE POLARISÉE.

Rayon réfléchi. — Angle de polarisation. — Un rayon de lumière naturelle qui tombe sur un miroir de verre peut toujours se décomposer en deux vibrations rectangulaires, l'une perpendiculaire, l'autre parallèle au plan d'incidence, égales entre elles.

La première est parallèle à la surface du milieu; elle se réfléchit sous toutes les incidences en quantités qui augmentent de l'incidence normale à l'incidence rasante.

La deuxième, située dans le plan d'incidence, ne suit pas une loi aussi simple. Elle se réfléchit en proportion décroissante de l'incidence zéro à une incidence déterminée I, qu'on nomme *angle de polarisation*. Dans ce cas, elle se réfracte, mais ne se réfléchit pas. Si l'incidence croît, le rayon réfléchi se reproduit et son intensité augmente jusqu'à l'incidence de 90 degrés.

longueur d'onde

Il se pourrait

des tuyaux sonor

à la surface de l

question.

Un rayon ordi

est verticale ar

Si sa vibration

pagation, il aur

L'expérience p

deuxième crist

images ordinai

Ces propriét

du rayon O sor

gation, et diri

dans le plan de

Le rayon extr

particularités, a

Il faut donc que

et perpendiculair

Fresnel a prouv

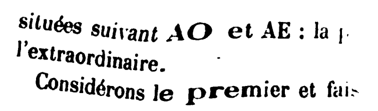
les vibrations étaie

tion. Admettant cet

Un rayon de lum

mais situées tantôt d

Fig. 650.



situées suivant AO et AE : la p

l'extraordinaire.

Considérons le premier et fais

...ıme, d'autre part, d'après la loi de Descartes,

Fig. 652.

$$\frac{\sin I}{\sin R} = n,$$

il faut que $\cos I = \sin R$, c'est-à-dire que les angles d'incidence et de réfraction soient complémentaires. Soient SA (*fig.* 652) le rayon incident, AB et AC les rayons réfléchi et réfracté ; les angles EAB et FAC étant complémentaires, AB est perpendiculaire à AC. L'angle de polarisation satisfait donc à cette condition, que le rayon réfléchi est perpendiculaire au rayon réfracté.

...ɔlarisation par réfraction. — Les deux composantes du rayon inci-

Fig. 653.



...ent. Celle qui est parallèle au plan d'incidence

est la plus intense. Il s'ensuit que la lumière transmise est partiellement polarisée dans le plan perpendiculaire au plan d'incidence. Elle ne l'est jamais totalement ; elle approche le plus de l'être sous l'incidence de polarisation par réflexion.

En prenant une pile de glaces suffisamment nombreuses, on parvient à augmenter cette polarisation partielle et à obtenir de la lumière transmise sensiblement polarisée, dont les vibrations sont parallèles au plan d'incidence. Cette pile de glaces arrête toute lumière polarisée dont les vibrations sont perpendiculaires au plan d'incidence.

Les expériences sur la polarisation par réflexion et par réfraction se font par l'appareil représenté (*fig.* 653). La substance est en D, au centre d'un cercle divisé ; le rayon incident arrive par le tube $a'A$ à travers un cristal qui le polarise, et il est reçu dans BC' sur un autre cristal qui fait connaître le sens de la polarisation.

CHAPITRE XI.

DOUBLE RÉFRACTION UNIAXIALE.

I. — THÉORIE.

Constitution des cristaux. — Haüy a montré que les cristaux sont constitués par des assises régulières de molécules, toutes orientées dans la même direction et pouvant se séparer les unes des autres en feuillets, par le clivage. Les formes générales du cristal sont déterminées par celle des molécules. On les ramène à cinq types, ou à cinq systèmes cristallins. Le premier est le système cubique : il offre une symétrie parfaite et réfracte la lumière comme les liquides, suivant la loi de Descartes; le deuxième et le troisième se rapportent au prisme droit à base carrée et au rhomboèdre. Ils possèdent un axe de symétrie Ox (*fig.* 654), et tout se passe de la même manière dans chaque section menée par cet axe, c'est-à-dire dans chaque section principale. Considérons l'une d'elles COx qui est le plan du tableau. Soit OC un rayon qui se propage de O en C.

Fig. 654.

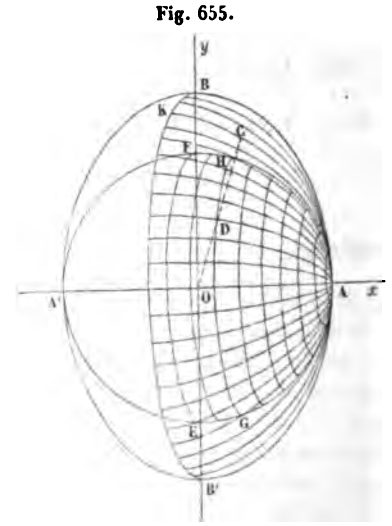
I. La vibration peut être dirigée suivant Oy perpendiculaire à Ox. Dans ce cas, lorsque la molécule d'éther O est écartée d'une quantité σ de O en y, elle tend à revenir à sa position première avec une force e proportionnelle à σ et à un facteur que j'appelle a^2; elle est donc σa^2. C'est cette force élastique e qui détermine le mouvement vibratoire, lequel se transmet suivant OC.

Or Newton a prouvé que, dans tous les milieux, la vitesse de propagation est proportionnelle à la racine carrée de la force élastique e, ou à $\sqrt{\sigma a^2}$; elle est proportionnelle à a; on peut dire qu'elle est égale à a.

D'où il suit qu'un rayon quelconque OC se propage toujours avec la même vitesse a, quelle que soit sa direction, si sa vibration Oy est normale

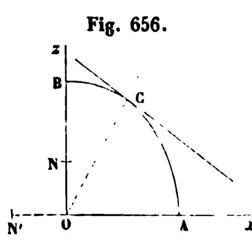
à la section principale COx. On peut dire que si le mouvement Oy se propage dans toutes les directions à la fois, il sera arrivé après l'unité de temps sur un cercle de rayon a, les vibrations restant en chacun de ses points parallèles à Oy. Comme le même raisonnement s'applique à toutes les sections principales, les vibrations qui leur sont perpendiculaires seront arrivées sur une sphère de rayon a, leur direction sera figurée sur cette sphère par des cercles parallèles entre eux et perpendiculaires à l'axe Oz (*fig.* 655).

Fig. 655.



II. Considérons en second lieu le cas où les vibrations du rayon se font dans la section principale. Supposons d'abord que OC soit confondu avec Ox; le déplacement σ (*fig.* 656) de la molécule O sera perpendiculaire à l'axe et égal à ON; il déterminera comme précédemment une force élastique σa^2, et la vitesse de propagation suivant Ox sera a : au bout de l'unité de temps le rayon sera arrivé en A.

Fig. 656.



Si, au contraire, le rayon se propage suivant Oz, la vibration se fera suivant ON un déplacement σ de la molécule O dans cette direction, qui est celle de l'axe, déterminera une force élastique différente de la première, que j'appelle σb^2, et alors la vitesse de propagation suivant Oz sera b: le rayon sera arrivé en B après l'unité de temps. Enfin si la lumière se propage suivant une ligne quelconque OC, elle aura parcouru une distance OC intermédiaire; le calcul prouve que C est sur une ellipse dont OA et OB sont les axes. Enfin comme tout se passe de la même manière dans chaque section principale, toutes les vibrations qui y seront contenues seront propagées sur un ellipsoïde de révolution autour de l'axe OX, et la direction des vibrations y sera tangente aux méridiens (*fig.* 655).

III. Abordons maintenant le cas général. Supposons que les vibrations

du rayon considéré ne se fassent ni perpendiculairement à la section principale suivant OM (*fig.* 657), ni dans cette section suivant ON, mais soient dirigées en OP, faisant un angle α avec ON. On pourra la décomposer en deux : l'une suivant OM égale à $\cos\alpha$, l'autre suivant ON égale à $\sin\alpha$. Elles se propageront séparément.

Fig. 657.

1° Elles auront des intensités exprimées par $\cos^2\alpha$ et $\sin^2\alpha$: c'est la loi de Malus.

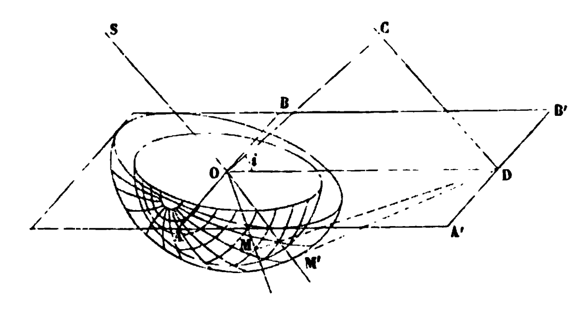
2° Elles vibreront : l'une ON dans la section principale, l'autre OM dans la section perpendiculaire.

3° La composante suivant OM aura dans toutes les directions une même vitesse a, comme dans un milieu non cristallisé ; elle se réfractera suivant la loi de Descartes : c'est le rayon ordinaire.

4° La composante suivant ON prend des vitesses variables, représentées par le rayon de l'ellipsoïde de révolution, elle ne suit pas la loi de Descartes : c'est le rayon extraordinaire. Une construction très-simple va nous donner la direction de ce rayon.

Construction d'Huyghens. — Un rayon SO (*fig.* 658) vient rencontrer la surface du cristal. A ce moment, le front de l'onde plane à laquelle ce

Fig. 658.



rayon appartient coupe la surface suivant AB, il est dans le plan CBA. Au bout de l'unité de temps, cette onde a marché de CD, que nous prendrons pour unité, la longueur $OD = \frac{1}{\sin i}$. Mais pendant ce temps le point O qui a été ébranlé a rayonné dans l'intérieur ; la vibration du rayon incident a

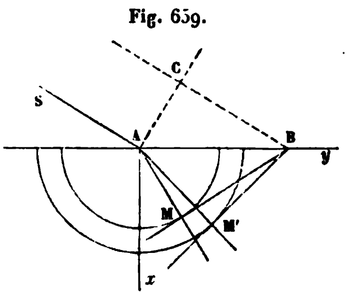
été décomposée en deux autres, l'une dans la section principale : elle sera arrivée sur l'ellipsoïde ; l'autre dans le plan normal : elle sera sur la sphère. D'autre part, l'onde réfractée passe en A'B' ; par conséquent, en menant des plans tangents par A'B' à la sphère et à l'ellipsoïde, on aura les surfaces des ondes réfractées, et en joignant les points de contact M, M' au centre O, on trouvera les deux pinceaux réfractés ordinaire et extraordinaire.

Telle est dans son ensemble la théorie de la double réfraction uniaxiale ; vérifions-la dans quelques détails.

II. — VÉRIFICATIONS.

I. *Lame parallèle à l'axe; plan d'incidence perpendiculaire à l'axe* (*fig.* 659). — Soit A la projection de l'axe : si nous appliquons à ce cas la règle d'Huyghens, nous voyons que le plan d'incidence coupe l'ellipsoïde suivant son équateur dont le rayon AM' est b, et la sphère suivant un cercle de rayon $AM = a$; prenons $AB = \frac{1}{\sin i}$, et, suivant une ligne B normale au plan de la figure, menons les deux plans tangents. Les points de contact M et M' seront évidemment dans le plan d'incidence ; on a

Fig. 659.



$$\sin r = \frac{AM}{AB} = \frac{a}{\frac{1}{\sin i}} = a \sin i, \quad \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{1}{a} = n_o.$$

$$\sin r' = \frac{AM'}{AB} = \frac{b}{\frac{1}{\sin i}} = b \sin i, \quad \frac{\sin i}{\sin r'} = \frac{1}{b} = n_e.$$

Les deux rayons suivent la loi de Descartes. Pour vérifier ce résultat, on taille un prisme dont les arêtes soient parallèles à l'axe, on le fixe verticalement au centre d'un cercle divisé, et l'on mesure la déviation minimum des rayons ordinaire et extraordinaire. On calcule les indices, et on trouve que, pour toutes les incidences, la déviation est conforme aux formules établies pour les prismes de verre.

On a trouvé pour les indices de la raie D :

	n_o	n_e
Spath....................	1,658	1,486
Quartz....................	1,544	1,553

II. *Lame parallèle à l'axe ; plan d'incidence contenant l'axe* (*fig.* 660). — Dans ce cas, l'ellipsoïde et la sphère se projettent suivant ADA′, ACA′, l'axe suivant Ox, et les plans tangents suivant BM et BM′. Les rayons réfractés OM et OM′ sont dans le plan d'incidence, les points M et M′ sont sur une même perpendiculaire à Ox. Par suite,

Fig. 660.

$$\frac{\tang r}{\tang r'} = \frac{PM'}{PM} = \frac{b}{a} = \frac{n_o}{n_e}.$$

Le rayon extraordinaire est encore réfracté dans le plan d'incidence, mais il ne suit plus la loi de Descartes.

III. *Lame perpendiculaire à l'axe.* — L'axe étant Ox (*fig.* 661), toute section des surfaces d'onde passant par cette ligne donne un cercle ADA′ et une ellipse CDC′ dont les axes sont a et b. Le point de contact M′ est encore dans le plan d'incidence.

Fig. 661.

Si l'on décrit un cercle OCE de rayon b, et qu'on mène à ce cercle une tangente BM″, les points M″M′ seront sur une même perpendiculaire M‴P à Ox. On a, en désignant par ρ l'angle POM″,

$$\frac{\tang r'}{\tang \rho} = \frac{M''P}{M'P} = \frac{b}{a};$$

on a de plus

$$\sin\rho = \frac{OM''}{OB} = b\sin i,$$

par suite

$$\tang r' = \frac{b}{a}\,\frac{\sin\rho}{\cos\rho} = \frac{b^2\sin i}{a\sqrt{1 - b^2\sin^2 i}}.$$

Malus a vérifié cette relation comme la précédente. Du moment qu'elle est démontrée, on peut conclure que la section de l'onde extraordinaire par un plan diamétral quelconque est une ellipse dont les axes sont a et b,

et par suite que la surface de cette onde est un ellipsoïde de révolution dont cette ellipse est la génératrice. L'étude de ce cas suffirait pour justifier la théorie. Cette étude conduit en outre à une remarque importante : b étant plus grand que a, n_e est plus petit que n_o ; le rayon extraordinaire OM' est plus éloigné de l'axe que l'ordinaire OM. Le contraire aurait lieu si b était plus petit que a ou n_e plus grand que n_o. Or, c'est justement ce qui a lieu pour le quartz ; aussi, dans ce cristal, le rayon extraordinaire est plus rapproché de la normale que le rayon ordinaire.

On peut dès lors diviser les cristaux en deux classes : les premiers, où $n_e < n_o$; on les nomme *répulsifs*, parce que le rayon OM' est comme repoussé par l'axe ; les autres, où $n_e > n_o$, dans lesquels OM' semble attiré par l'axe ; on les appelle *attractifs*.

CRISTAUX ATTRACTIFS.

Zircon.	Sulfate de potasse et de fer.
Quartz.	Glace.
Stannite.	Hyposulfate de chaux.

CRISTAUX RÉPULSIFS.

Spath.	Idocrase.
Tourmaline.	Mica.
Corindon.	Phosphate de plomb.
Saphir.	Arséniate de potasse.
Rubis.	Cinabre.
Émeraude.	Arséniate de plomb.
Béryl.	Arséniate de cuivre.

III. — APPLICATIONS.

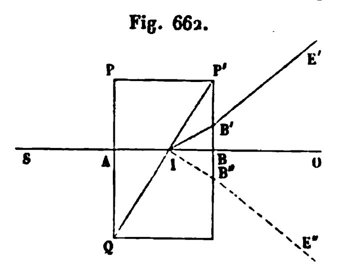
Pour étudier les phénomènes de polarisation, nous nous sommes servi de gros rhomboèdres de spath. On peut les remplacer par des prismes biréfringents moins volumineux et moins coûteux.

Prismes de Rochon et de Wollaston (*fig.* 662). — Deux prismes de spath de même angle α sont collés l'un à l'autre par de la térébenthine ; la face PQ du premier est normale à l'axe, les arêtes du second sont parallèles à cet axe. De cette façon, la section normale du biprisme contient l'axe AI du premier, c'est une section principale ; elle est perpendiculaire à la section principale du second.

Un rayon incident normal de lumière naturelle SA traverse le premier prisme sans déviation et ordinairement. Il se dédouble au point I en ce

rayon ordinaire IB, qui continue sa route en ligne droite et sort suivant BO, polarisé perpendiculairement au plan de la figure, et en un rayon extraordinaire IB′, qui émerge suivant B′E′, polarisé dans le plan de la figure.

Fig. 662.



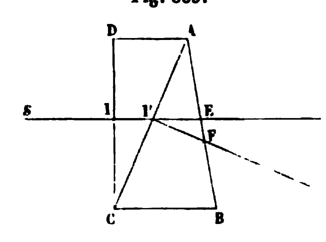
Le prisme de Wollaston diffère du précédent en ce que l'axe du premier cristal est dirigé suivant PQ et non suivant AI; rien n'est changé au second prisme.

En A le rayon se dédouble en deux, qui se propagent suivant la même direction AI : l'un ordinaire avec une vitesse a, l'autre extraordinaire avec une vitesse b, polarisés le premier dans le plan de la figure, le deuxième perpendiculairement.

Le rayon ordinaire, en rencontrant QP′, se réfracte extraordinairement et prend la vitesse b et la direction IB′, puis il reprend la vitesse 1 dans l'air et sort en B′E′; il suit de là qu'il éprouve la même série d'actions que dans le prisme de Rochon, et qu'il suit la même route. Quant au rayon extraordinaire, il suit la voie IB″E″.

On se contente le plus généralement de prismes de spath ACB taillés sous un angle quelconque (*fig.* 663). L'une des faces AB est naturelle, l'autre AC est taillée perpendiculairement à la section principale. On y accole un autre prisme de verre ACD dont l'angle est un peu plus petit. Un rayon SI tombant normalement sur le verre se décompose dans le spath en deux autres : l'un extraordinaire, qui n'éprouve qu'une déviation et une dispersion très-faibles, parce que les indices du verre et du rayon extraordinaire sont sensiblement égaux; l'autre ordinaire, qui a un indice beaucoup plus grand et se trouve rejeté vers la base BC.

Fig. 663.

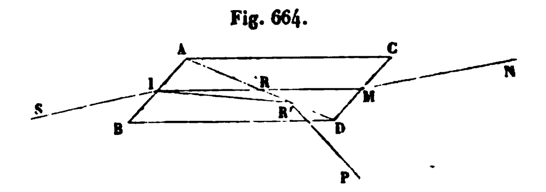


Prisme de Nicol. — Soit ABCD (*fig.* 664) un long morceau de spath : AB et CD sont les projections de deux faces de clivage sur le plan de la figure qui est une section principale; AC, BD, IM sont les arêtes. On divise ce cristal en deux morceaux par une section AD très-oblique; on en polit les deux faces, et on les recolle dans leur position première avec du baume du Canada dont l'indice 1,529 est intermédiaire entre n_o et n_e.

Un rayon incident SI se divise en deux : l'ordinaire IR′ très-dévié se

réfléchit totalement sur la couche AD de baume de Canada qui a un indice moindre. L'autre rayon IR qui se réfracte extraordinairement est moins

Fig. 664.



dévié, il ne se réfléchit pas totalement et il est transmis en RMN. Le prisme de Nicol offre donc le moyen de polariser la lumière en supprimant l'une des deux images.

Foucault a eu l'heureuse idée de supprimer le baume de Canada et de laisser une couche d'air entre les deux prismes juxtaposés; les deux rayons peuvent se réfléchir totalement, mais sous des incidences différentes. En donnant à l'angle BAD une valeur de 35 degrés, le faisceau extraordinaire passe seul; de cette façon le prisme peut être très-raccourci.

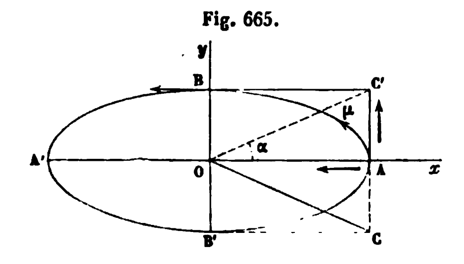
CHAPITRE XII.

VIBRATIONS ELLIPTIQUES.

I. — THÉORIE GÉNÉRALE.

Supposons un rayon de lumière se propageant en O perpendiculairement au plan du tableau (*fig.* 665), admettons qu'il soit polarisé et que ses vibrations se fassent de A′ en A, puis de A en A′, de sorte que OA soit un quart de vibration. Soit un second rayon O superposé au premier, mais dont les vibrations se font de B′ en B, puis de B en B′. Nous voulons chercher l'effet produit par la superposition de ces deux vibrations.

Fig. 665.



Si elles sont concordantes, c'est-à-dire si elles partent au même moment du point O, l'une vers OA avec une vitesse x, l'autre vers OB avec une vitesse y, elles se superposeront, suivant la loi du parallélogramme, en OC, ce qui reconstituera un rayon unique vibrant dans une direction donnée par la formule

$$\tang \alpha = \frac{y}{x};$$

la même chose aurait lieu si les deux vibrations rectangulaires considérées avaient une différence de marche λ, $2\lambda, \ldots, n\lambda$, ou en général $2n\frac{\lambda}{2}$.

Supposons que la vibration y soit en retard de $\frac{\lambda}{2}$ sur x, alors quand le mouvement partira de O à A dans le sens des x, il se fera de O vers B dans le sens des y, et les deux vibrations se composeront encore en une seule, dans la direction OC′ :

$$\tang \alpha' = -\frac{y}{x};$$

la même chose aurait lieu si la différence de marche était égale à $\frac{3\lambda}{2}$, $\frac{5\lambda}{2}$, et en général à $(2n+1)\frac{\lambda}{2}$.

On voit donc que deux vibrations rectangulaires superposées reproduisent une vibration plane, si elles ont des différences de marche multiples de $\frac{\lambda}{2}$, dans des azimuts $\pm\alpha$, suivant que ce multiple est pair ou impair.

Mais dans le cas où la différence de marche sera quelconque, les deux vibrations ne se composeront pas d'une manière aussi simple. Supposons qu'elles diffèrent de $\frac{\lambda}{4}$. Quand la vibration x sera arrivée en A, la vibration y commencera son mouvement. La molécule d'éther partira de A pour revenir vers O et pour s'élever vers C ; elle décrira une ligne courbe dans le sens de la flèche μ. Après un temps égal au quart de celui d'une vibration, cette molécule sera arrivée en B ; à ce moment, les deux vitesses qui se composent la pousseront de droite à gauche vers x', et du haut en bas, vers O. La molécule continuera son mouvement curviligne et décrira une branche A'B symétrique de la précédente AB ; enfin elle reviendra de A' en B' et en A symétriquement à ABA'. Elle aura parcouru, pendant la durée d'une vibration, une trajectoire à deux axes rectangulaires inégaux, OA et OB : c'est évidemment une ellipse.

Si la différence de marche était $\frac{\lambda}{4}$, $\frac{5\lambda}{4}$, $\frac{9\lambda}{4}$, ..., la même ellipse se reproduirait avec le même sens de mouvement. Si cette différence était $\frac{3\lambda}{4}$, $\frac{7\lambda}{4}$, ..., on aurait encore la même courbe, le sens du parcours seul aurait changé. Enfin si les deux composantes ne différaient pas d'un multiple exact de $\frac{\lambda}{4}$, la vibration résultante se ferait suivant des ellipses inclinées sur les axes Ox, Oy. Il n'est pas nécessaire d'examiner ce cas général.

Réciproquement, toute vibration elliptique provenant de causes quelconques, peut se décomposer en deux autres vibrations planes, suivant deux directions rectangulaires quelconques. Elle peut se décomposer d'abord, suivant ses axes, en deux vibrations OA, OB, l'une d'amplitude maxima, l'autre minima, toutes deux différant de $\frac{\lambda}{4}$; elle peut aussi se décomposer suivant deux axes rectangulaires, à 45 degrés des axes, en deux rayons qui auront, par symétrie, des intensités égales.

Analyseur. — L'œil n'est point averti de ces compositions de mouvement. Pour les constater, il faut recevoir la lumière sur un prisme biréfringent. Si la différence de marche des composantes Ox et Oy est un multiple pair ou impair de $\frac{\lambda}{2}$, la résultante sera OC ou OC', et le rayon sera polarisé; si l'on met la section principale du prisme suivant OC ou OC', l'image ordinaire sera éteinte. Quand, au contraire, le rayon qu'on veut analyser vibre elliptiquement, on verra ce qui suit :

1° On verra deux images ordinaire et extraordinaire; elles auront des intensités variables avec la direction de l'analyseur, mais elles ne s'éteindront pas.

2° Mis à 45 degrés des axes Ox et Oy, l'analyseur donnera deux images égales.

3° Suivant l'axe Ox, le rayon extraordinaire sera maximum, l'ordinaire minimum, et inversement si la section principale coïncide avec Oy. Ces deux composantes du mouvement elliptique différeront de $\frac{\lambda}{4}$; le rapport de leur intensité sera celui des carrés des axes OA et OB.

On pourra donc toujours, avec un prisme biréfringent, reconnaître une vibration elliptique, déterminer la direction et le rapport de ses axes.

Vibration circulaire. — Si Ox et Oy ont les mêmes intensités, les deux axes de l'ellipse résultante sont égaux : c'est un cercle. La vibration circulaire résulte donc de la superposition de vibrations égales différant de $\frac{\lambda}{4}$; elle se décompose suivant deux directions rectangulaires quelconques, en deux rayons égaux, comme si elle était un rayon de lumière naturelle.

II. — COULEURS DES LAMES MINCES CRISTALLISÉES.

On réalise les phénomènes dont nous venons de faire la théorie, au moyen des lames minces cristallisées, parallèles à l'axe.

Soit O (*fig.* 665) un rayon de lumière polarisée, vibrant suivant OC. On peut décomposer cette vibration en deux : l'une $Ox = \cos\alpha$, l'autre $Oy = \sin\alpha$, et les recevoir sur une lame cristallisée dont l'axe est confondu avec Ox; la première se réfracte extraordinairement, la deuxième ordinairement, toutes deux marchent avec des vitesses différentes en suivant la même direction, et, à la sortie, elles se trouvent avoir pris une différence

de marche d, proportionnelle à l'épaisseur traversée. $\frac{d}{\frac{\lambda}{2}} = \frac{2d}{\lambda}$ sera la fraction de demi-longueur d'onde qui exprimera ce retard.

I. Supposons que $\frac{2d}{\lambda}$ soit un multiple pair, les deux vibrations restent d'accord à la sortie, vibrent suivant OC et ne donnent qu'une image extraordinaire à travers un analyseur dont la section est dirigée suivant OC.

Si $\frac{2d}{\lambda}$ est un multiple impair, les vibrations se composent en une seule suivant OC', et en tournant l'analyseur dans cette direction, on éteint l'image ordinaire.

Pour réaliser ces conditions, on superpose deux prismes de quartz très minces et d'un angle très-aigu (*fig.* 666), l'un BCA dont l'axe est dirigé suivant AB dans le plan du tableau, l'autre BCD ayant son axe dans la face CD, mais normale à ce plan. Un rayon qui se réfracte ordinairement dans le premier traverse extraordinairement le second, et inversement. Par conséquent un rayon de lumière polarisé se décompose en deux vibrations ordinaire et extraordinaire qui ont à la sortie une différence de marche déterminée par la différence des épaisseurs traversées dans les deux prismes superposés. Elle est nulle suivant MN ; elle augmente positivement ou négativement des deux côtés de cette section, et prend successivement les valeurs o, $\pm\frac{\lambda}{2}$, $\pm\frac{2\lambda}{2}$, $\pm\frac{3\lambda}{2}$, ...

Fig. 666.

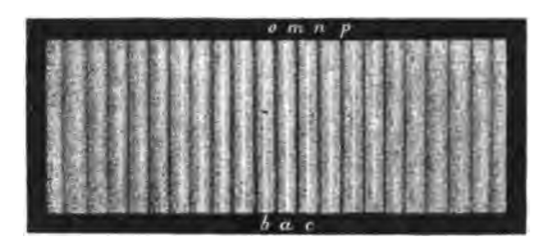
A B C D M N

Si donc on interpose cet appareil dans le trajet d'un rayon O qui vibre suivant OC (*fig.* 665), en mettant sa section principale suivant Ox, l'image ordinaire de l'analyseur dirigé suivant OC donnera des bandes noires l'une en MN, les autres également espacées des deux côtés de MN aux points où la différence de marche est un multiple pair de $\frac{\lambda}{2}$, et des bandes lumineuses aux endroits où cette différence est un multiple impair. Si l'on tourne l'analyseur suivant OC', les bandes noires seront devenues lumineuses, et celles qui étaient lumineuses seront noires (*fig.* 667).

Mais elles ne se placeront pas aux mêmes endroits pour les diverses couleurs, puisque λ varie : elles seront plus rapprochées pour le violet, plus larges pour le rouge; et comme c'est la même condition qui détermine les couleurs des anneaux colorés, les bandes, dans l'image ordinaire, et

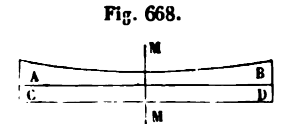
ront la teinte des anneaux réfléchis quand l'analyseur sera suivant OC, des anneaux transmis s'il est suivant OC'.

Fig. 667.



Pour rendre cette assimilation encore plus frappante, Biot imagina de superposer deux lames de quartz croisées, dont la supérieure est taillée en cuvette (*fig.* 668), et qui ont la même épaisseur en leur milieu MM. La différence est nulle à ce centre; elle augmente ensuite régulièrement et également dans toutes les directions autour de ce point, et l'appareil donne rigoureusement les mêmes couleurs que le système des deux verres de Newton.

Fig. 668.



Prenons maintenant une lame mince cristallisée, d'épaisseur uniforme : on en obtient aisément par le clivage, avec du mica ou du sulfate de chaux. Quand nous les placerons dans la lumière polarisée devant un analyseur, elles donneront deux images Ox, Oy, qui prendront des différences de marches proportionnelles à leur épaisseur, et constantes, puisque cette épaisseur est la même en tous leurs points. Si les différences de marche sont un multiple de $\frac{\lambda}{2}$, elles reproduisent la polarisation rectiligne; dans tous les autres cas, elles donnent une vibration elliptique. Examinons celui où elles sont égales à $\frac{\lambda}{4}$ ou à un multiple de $\frac{\lambda}{4}$.

Alors la vibration elliptique a ses axes suivant Ox et Oy (*fig.* 665); l'analyseur donne toujours deux images : l'extraordinaire est maximum quand la section principale de cet analyseur est suivant Ox; toutes deux sont égales à 45 degrés de Ox et de Oy.

Si $\alpha = 45°$, c'est-à-dire si la vibration incidente est à 45 degrés de Ox, les deux composantes primitives sont égales, l'ellipse est devenue un cercle, et les deux images données par l'analyseur sont toujours égales.

Cette lame d'*un quart d'onde* peut servir à analyser le phénomène qu'offrent toutes les autres. Mettons-la dans le trajet de la lumière polarisée qui a traversé une première lame et qui est maintenant constituée par des vibrations elliptiques dont les axes sont dirigés d'une manière quelconque; tournons sa section principale suivant l'un des axes de l'ellipse. Elle laissera passer les deux rayons composants qui avaient une différence de marche $\frac{\lambda}{4}$, elle leur ajoutera $\pm\frac{\lambda}{4}$; par conséquent elle les ramènera à la concordance, et le rayon sera redevenu polarisé.

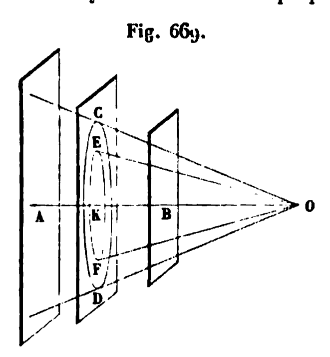
Toute lame mince offrira une des teintes que nous avons analysées avec l'appareil de la *fig.* 666, c'est-à-dire les teintes des anneaux transmis dans l'une des images et des anneaux réfléchis dans l'autre. Elles sont complémentaires, produisent du blanc à l'endroit où elles se superposent, et échangent leurs coulêurs quand la section de l'analyseur passe de AC à AC'. C'est un des phénomènes les plus beaux de l'Optique. Comme il dépend de l'épaisseur, on peut avec un grattoir amincir certaines parties de la lame et faire des dessins de fleurs ou d'insectes; ce magnifique phénomène a été découvert par Arago, étudié par Biot et expliqué par Fresnel.

III. — CAS D'UNE LAME NORMALE A L'AXE.

Je vais étudier un dernier phénomène, dont la complication parait très grande, et qui s'explique avec la même facilité que les précédents.

Au moyen de lentilles on prépare un faisceau conique de lumière COD (*fig.* 669) qu'on reçoit en O dans l'œil. On le polarise par une tourmaline A et on l'éteint par une seconde B croisée avec la première, puis on interpose entre les deux une lame CD d'un cristal taillé perpendiculairement à son axe KO. Dans ces conditions, les bords sont traversés obliquement par le cône COD, tandis que les parties moyennes le sont par EOF, sous une inclinaison moindre, et le centre K reçoit normalement la lumière. On voit alors le phénomène représenté (*fig.* 670) : c'est une croix noire parallèle et perpendiculaire au plan des vibrations primitives et entre les branches les anneaux à centre noir de Newton. Vient-on à tourner de 90 degrés la tourmaline B,

Fig. 669.



l'aspect est complémentaire (*fig.* 671), la croix est blanche et les anneaux sont à centre blanc.

Fig. 670.

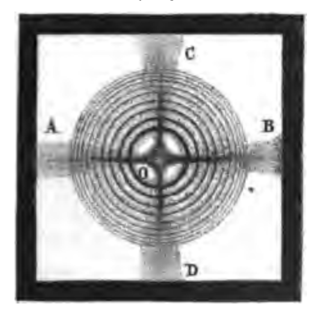
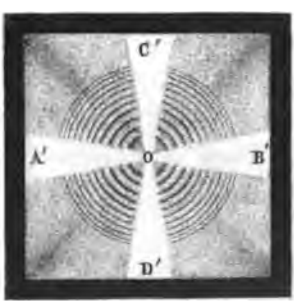


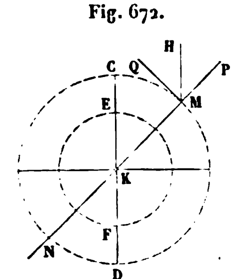
Fig. 671.



Voici maintenant l'explication. Supposons vertical le plan des vibrations primitives; coupons le cône COD par deux plans, vertical et horizontal, c'est-à-dire parallèle et perpendiculaire aux vibrations. Ce sont deux sections principales puisqu'elles contiennent l'axe OK; les rayons en se réfractant ne changeront pas leur plan de vibration; par conséquent, puisqu'ils étaient éteints avant l'interposition du cristal, ils le seront encore après. On verra donc une croix noire.

Prenons maintenant une section principale MN (*fig.* 672) inclinée à 45 degrés du plan vertical CEFD. La vibration incidente HM sera décomposée en deux : l'une MP, l'autre MQ, qui se réfracteront extraordinairement et ordinairement, qui prendront une différence de marche à travers le cristal, et qui donneront une vibration elliptique. La tourmaline analyseur décomposera cette vibration en deux et laissera passer l'image extraordinaire qui sera colorée. La différence de marche augmentant du centre K aux bords M du champ de vision, puisque l'inclinaison des rayons augmente, elle prendra les valeurs successives λ, 2λ, 3λ; dans ce cas, elle gardera sa direction de vibrations primitive et sera éteinte par l'analyseur : on aura des cercles noirs. Il y aura d'autres points pour lesquels cette différence sera $\frac{\lambda}{2}$, $\frac{3\lambda}{2}$, ils donneront des cercles brillants. En tournant de 90 degrés la tourmaline B, tout devient complémentaire.

Fig. 672.



Tous les cristaux à un axe agissent de même ; ceux à deux axes sont plus compliqués, ils donnent les apparences qu'on voit *fig.* 673 et 674. Non-

Fig. 673.

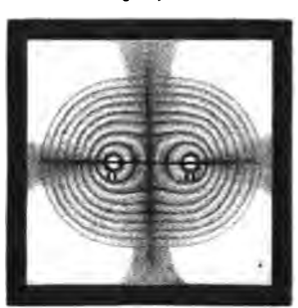


Fig. 674.



seulement les cristaux, mais tous les verres qui, par la trempe, le recuit, la pression, la flexion ou une action mécanique quelconque, ont pris des

Fig. 675.

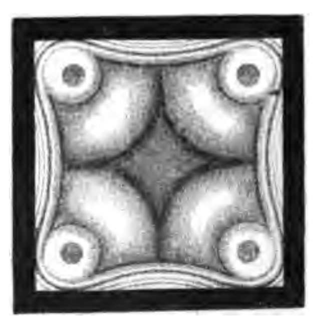


Fig. 676.



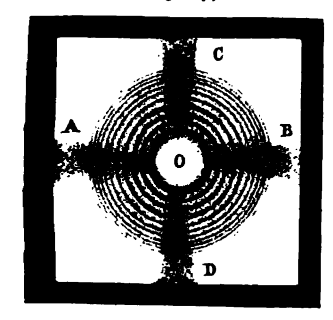
élasticités inégales suivant diverses directions, produisent des actions analogues, des dessins très-beaux et des couleurs très-vives (*fig.* 675 et 676

CHAPITRE XIII.

ROTATION DU PLAN DES VIBRATIONS.

Une lame d'un cristal à un axe taillée perpendiculairement à cet axe ne dédouble pas la lumière qui la traverse normalement, ne change pas le plan de vibration, et se conduit en tout comme un liquide. Une substance fait exception : c'est le quartz. Tout rayon de lumière polarisé qui la traverse suivant l'axe donne deux images, ordinaire et extraordinaire, colorées de teintes complémentaires très-vives, et dans la lumière convergente la croix noire des cristaux à un axe ne se prolonge pas jusqu'au centre (*fig.* 677). L'apparence est la même qu'avec une lame mince cristallisée parallèle à l'axe; elle en diffère par deux points : le premier, c'est qu'elle ne varie pas si l'on fait tourner le quartz autour de sa normale; le second, c'est que les couleurs varient progressivement en passant par une série de teintes mixtes, si l'on déplace la section principale de l'analyseur. Arago, qui a découvert ces phénomènes en 1811, a prouvé que chacun des rayons simples qui composait la lumière incidente est resté polarisé, mais que son plan de vibration a éprouvé une rotation qui est différente pour chaque couleur : de là le nom de *polarisation rotatoire* qui a été donné et conservé à ce phénomène.

Fig. 677.



Deux ans après cette découverte, Biot reconnut que cette propriété n'appartient point exclusivement au quartz; il la retrouva dans la plupart des huiles essentielles, dans la vapeur de l'essence de térébenthine, dans les dissolutions de l'acide tartrique, des tartrates, du sucre, des gommes et de la dextrine. M. Bouchardat la constata dans les alcalis organiques, M. Des Cloizeaux dans le cinabre, et M. Marbach, de Breslau, dans les

cristaux de bromate et de chlorate de soude qui ont la forme cubique. Nous avons donc affaire ici à une propriété réalisée par une classe de corps nombreux, cristallisés ou non, solides, liquides et même gazeux.

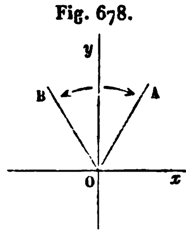
Lois du phénomène. — Biot reconnut :

1° Que la lumière simple reste polarisée, mais que son plan de vibration a tourné d'un angle A.

2° Que la rotation du plan de vibration est proportionnelle à l'épaisseur L du cristal.

3° Il y a des substances pour lesquelles le plan primitif de vibration Oy se déplace (*fig.* 678) vers la droite en OA dans le sens indiqué par la flèche ↗ : la substance est dextrogyre. D'autres corps transportent le plan de vibration en OB ↖ ils sont lévogyres. Il existe en particulier deux variétés de quartz, l'une dextrogyre ↗, l'autre lévogyre ↖. A épaisseur égale, elles donnent des rotations égales qui ne diffèrent que par leur signe.

Fig. 678.



4° La rotation augmente avec la réfrangibilité de la lumière ; elle est en raison inverse du carré de la longueur d'onde.

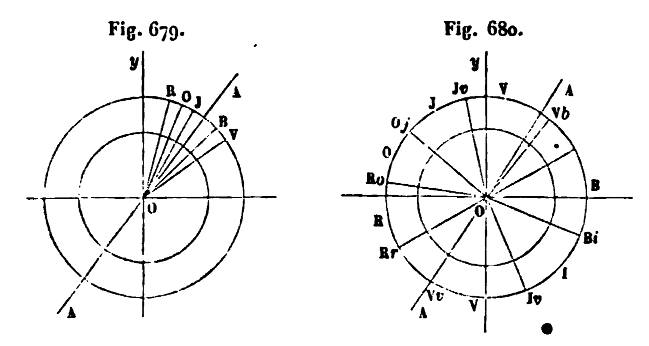
Le tableau suivant fait connaître la rotation de chaque couleur à travers une épaisseur de quartz égale à 1 millimètre :

	Valeur de λ.	Rotation.
		° ′ ″
Verre rouge....................	0,000 628	18.25.00
Jaune moyen....................	0,000 550	24.00.00
Vert-bleu......................	0,000 492	30. 2.45
Indigo.........................	0,000 459	34.34.18
Violet extrême.................	0,000 406	44. 4.58

Voici comment on peut représenter graphiquement (*fig.* 679) l'action exercée sur la lumière. Prenons une plaque d'épaisseur égale à 0^{mm},5 Représentons par Oy le plan primitif de vibration, et menons des rayons OR, OO,..., OV faisant avec Oy des angles égaux aux rotations des diverses couleurs simples ; le faisceau de lumière polarisée blanche qui aura traversé la lame se trouvera représenté par une infinité de vibrations éparpillées sur l'arc RV. L'épaisseur augmentant, la déviation de chaque vibration augmente proportionnellement, et l'arc de dispersion s'agrandit. La *fig.* 680 représente le phénomène quand l'épaisseur est égale à 13^{mm},41. Le rouge extrême est dévié de plus de 180 degrés en Rr, et le violet extrême Vv de plus d'une circonférence et demie en OVv. De cette façon

l'arc de dispersion compris entre Rr et Vv occupe à peu près 360 degrés, sur lesquels les plans de vibration des couleurs intermédiaires sont répartis comme l'indique la figure.

Fig. 679. Fig. 680.



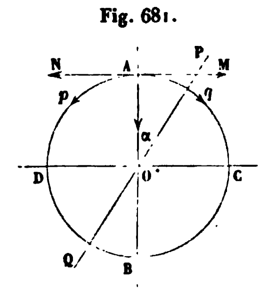
Concevons maintenant que l'analyseur soit placé dans une direction quelconque AA. Les images ordinaire et extraordinaire seront formées par la superposition des images ordinaire et extraordinaire de chaque lumière simple, et celles-ci étant inégales, celles-là seront colorées. L'image ordinaire ne contiendra aucun des rayons qui vibrent suivant OA; c'est un vert pour la *fig.* 679; c'est le vert-bleu et le violet dans la *fig.* 680.

Teinte sensible. — Quand l'arc de rotation Rv est plus petit qu'une demi-circonférence, et qu'on place l'analyseur AA dans le sens des vibrations jaunes (*fig.* 679), l'image ordinaire ne contient pas de jaune, presque pas d'orangé et de vert, un peu plus de rouge et de violet; les couleurs les plus éclatantes ont disparu, ce qui reste est un minimum et constitue une teinte gris de lin. Si l'on déplace l'analyseur vers la droite ou vers la gauche, elle rougit ou bleuit si rapidement, qu'on l'a nommée *teinte sensible*. Réciproquement, quand on a tourné l'analyseur jusqu'à obtenir la teinte sensible, on est assuré que la section principale est dans le plan des vibrations jaunes. En multipliant la rotation par $\frac{23}{30}$, on aura celle du rouge, et par des facteurs en raison inverse du carré de leurs longueurs d'onde, celle des diverses couleurs. Si, en tournant l'analyseur à droite, la teinte passe au rouge, la substance est dextrogyre; elle est lévogyre si la teinte vire au bleu.

Théorie de Fresnel. — Il nous reste à dire comment Fresnel a expliqué ces phénomènes.

Supposons que la vibration du rayon incident se fasse de A en B (*fig.* 681). Au moment où elle arrive en A et qu'elle va revenir vers O, décomposons-la par la pensée en deux moitiés égales, et ajoutons-y deux autres vibrations égales et contraires suivant AM et AN qui ne changeront rien au système. AM et l'une des moitiés de AO formeront un rayon circulaire dextrogyre suivant Aq, tandis que AN et l'autre moitié de AO constitueront une vibration circulaire lévogyre Ap. Ainsi l'on peut toujours remplacer une vibration plane par deux vibrations circulaires contraires égales à la moitié de la première. Elles se rencontreront au point B, après des nombres impairs de demi-vibrations, et au point A après des nombres pairs.

Fig. 681.

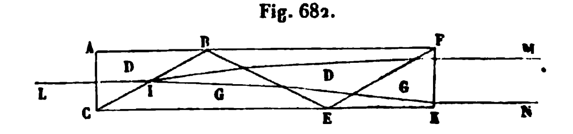


Réciproquement, deux rayons circulaires contraires qui se rencontrent en A peuvent se décomposer en AM, AN qui se détruiront, et en deux composantes AO qui s'ajouteront pour reproduire la vibration plane AO.

Si, dans un milieu quelconque, les deux rayons circulaires que nous venons d'imaginer marchent avec la même vitesse, ils se rencontrent toujours en A et en B à chaque demi-vibration, et reproduisent le mouvement rectiligne original. Mais s'il existait des substances où le rayon dextrogyre allât plus vite que le lévogyre, la rencontre se ferait non pas suivant AB, mais suivant PQ, et alors les deux vibrations circulaires reproduiraient une vibration plane PQ faisant un certain angle avec AB. Cet angle serait évidemment proportionnel à l'épaisseur du milieu traversé, et les phénomènes rotatoires seraient expliqués.

Il reste à montrer qu'en réalité le quartz produit cette action spéciale. A cet effet, Fresnel a disposé plusieurs prismes en quartz de rotation alternativement contraire, qui sont traversés dans la direction de l'axe ABF (*fig.* 682). Un rayon polarisé se dédouble dans le premier ABC, qui est

Fig. 682.



de rotation droite, en deux rayons circulaires, l'un droit, l'autre gauche; le premier marche plus vite que le second; mais, en pénétrant dans CBE, il va moins vite; dès lors il se rapproche de la normale pendant que le

circulaire gauche s'en éloigne en vertu de la théorie de la réfraction; tous deux se séparent, et, l'action continuant à chaque surface traversée, on finit par obtenir une double réfraction très-sensible. Les deux images sont égales et blanches, il s'agit de voir si elles sont polarisées circulairement.

1° On les reçoit sur un prisme biréfringent; elles donnent deux images ordinaire et extraordinaire d'égale intensité, ce qui est le caractère des rayons circulaires.

2° On interpose dans le trajet de chacun d'eux une lame d'un quart d'onde; elle les décompose en deux vibrations, l'une extraordinaire dans sa section principale, l'autre ordinaire dans le plan perpendiculaire, et qui ont une différence de marche : positive et $\frac{\lambda}{4}$ pour le premier rayon, négative et $\frac{\lambda}{4}$ pour le second. A cette difference, la lame ajoute $+\frac{\lambda}{4}$, ce qui fait une somme $+\frac{\lambda}{2}$ ou zéro. Les deux rayons circulaires sont alors ramenés à des vibrations planes à 45 degrés des axes, et perpendiculaires entre elles. Ils sont polarisés. L'expérience justifie ces conclusions, et par suite la remarquable intuition de Fresnel.

Pouvoir rotatoire moléculaire. — Dans les liquides actifs, il faut admettre que chaque molécule possède en elle-même un pouvoir rotatoire propre. Dès lors la rotation du plan de polarisation produite par un milieu liquide sera proportionnelle au nombre des molécules traversées, c'est-à-dire à l'épaisseur et à la densité de la substance active. Dissolvons un poids ε de cette substance dans un poids $1-\varepsilon$ d'un milieu inactif; si δ est la densité du mélange, le volume total sera $\frac{1}{\delta}$, et la densité x du corps actif ramené à ce volume sera

$$x = \frac{\varepsilon}{\frac{1}{\delta}} = \varepsilon\delta.$$

On devra avoir pour la rotation A

$$A = Kl\varepsilon\delta.$$

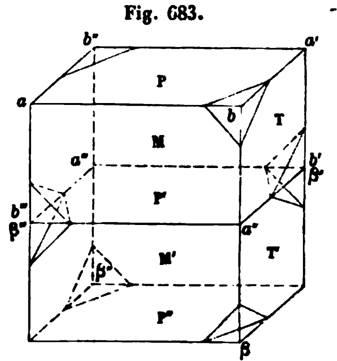
Le coefficient K est ce que Biot a nommé le *pouvoir rotatoire moléculaire*.

Saccharimétrie. — Le sucre est une substance active. En dissolvant un poids connu ε de cette substance dans l'eau, mesurant la densité δ de la solution et observant la rotation A dans un tube de longueur l, on peut

calculer le coefficient K, et quand K sera connu, l'expérience permettra de calculer ε, c'est-à-dire la proportion inconnue de sucre qui sera contenue dans une solution quelconque. Tel est le principe de la méthode d'analyse optique des sirops sucrés.

Relation entre le pouvoir rotatoire et la forme cristalline. — En dissolution, tous les tartrates sont actifs et dextrogyres. Prenons, en particulier, le tartrate de soude et d'ammoniaque. Sa forme primitive est celle d'un prisme droit P'MT à base rectangulaire (*fig.* 683). Il a toujours sur ses sommets b, b', b'', b''' quatre facettes qui, si elles étaient prolongées, formeraient un tétraèdre irrégulier. La loi de symétrie d'Haüy exigerait que les autres sommets a, a', a'', a''' eussent aussi des facettes disposées de la même manière; cependant elles ne se présentent jamais. Alors le cristal est dit *hémièdre*.

Fig. 683.



Je suppose que l'observateur se place sur la base P', en avant du cristal, et qu'il regarde la face M : il verra la facette b vers sa droite et en haut de son corps. M. Pasteur convient d'exprimer ceci en disant que l'hémiédrie est à droite.

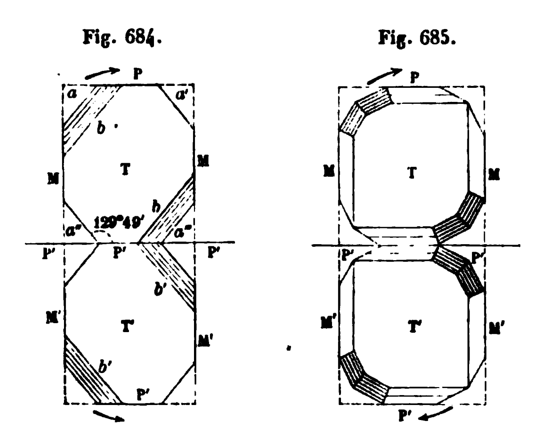
On peut se figurer maintenant le cristal P'M'P''T' qui serait égal au précédent et juxtaposé, et l'on peut imaginer qu'il ait des facettes sur les sommets qui n'en avaient point au premier cristal, c'est-à-dire en β, β', β'', β''', et qu'il n'en ait pas à ceux où précédemment on en voyait. Alors l'observateur placé sur la base P'', en avant du cristal, et tourné vers lui, verrait une facette β''' à sa gauche : ce serait l'hémiédrie gauche. Les deux cristaux seraient symétriques par rapport à la face P'. L'un serait l'image de l'autre dans le miroir P', et il est aisé de voir que, de quelque manière qu'on les tourne, les deux cristaux ne seraient pas superposables.

Cela posé, M. Pasteur remarque que tous les tartrates ont des formes voisines des précédentes (*fig.* 684 et *fig.* 685), qu'ils ont tous l'hémiédrie droite qu'on voit en T, jamais l'hémiédrie gauche qui est dessinée en T', qu'ils sont tous dextrogyres et jamais lévogyres. Voilà un premier rapprochement.

M. Gartner, de Thann, en extrayant les tartrates de potasse des vins, reconnut qu'en 1819 ces sels avaient exceptionnellement des propriétés

nouvelles, qu'ils donnaient, par exemple, un sel de chaux insoluble au lieu du tartrate de chaux qui est soluble. Il isola l'acide, trouva qu'il était isomère avec l'acide tartrique, que cependant il en différait par ses propriétés, et il le nomma acide *racémique*. Depuis cette époque, M. Mitscherlich découvrit que les racémates ne font point tourner le plan de polarisation.

Fig. 684. Fig. 685.



Longtemps après, M. Pasteur reconnut que les racémates ont la même forme que les tartrates correspondants, mais qu'ils n'ont point d'hémiédrie. Ainsi, pas de pouvoir rotatoire, pas d'hémiédrie : second rapprochement qui s'ajoute au précédent.

Mais un de ces racémates, par une exception que M. Pasteur eut le bonheur de reconnaître, le racémate double d'ammoniaque et de soude, se sépare par la cristallisation en deux sortes de cristaux qui offrent la même forme primitive, mais qui sont inversement hémièdres : les uns ont l'hémiédrie droite, comme PMP', les autres l'hémiédrie gauche, comme M'P'P'' (*fig.* 683). En général, la forme des cristaux est plus complexe, comme dans les *fig.* 684 et 685 ; mais il y a toujours deux sortes de formes hémièdres et symétriques, les unes T hémièdres à droite, les autres T' hémièdres à gauche.

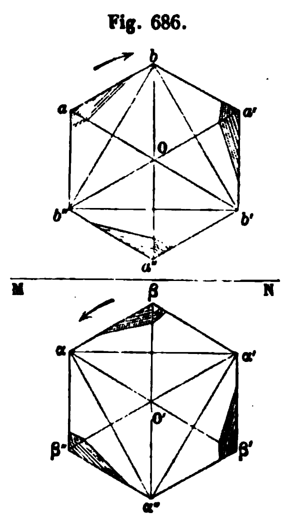
M. Pasteur sépara les deux espèces de cristaux, les fit redissoudre, et trouva que les premiers, qui avaient l'hémiédrie droite, étaient dextrogyres, et les seconds, qui étaient hémièdres à gauche, étaient lévogyres. Il en conclut que l'hémiédrie non superposable est le signe du pouvoir rotatoire, et que le sens de cette hémiédrie indique le sens de la rotation.

Il alla plus loin : il isola l'acide des dextroracémates, c'est-à-dire des cristaux qui avaient l'hémiédrie droite ; c'était de l'acide tartrique. Les

cristaux des lévoracémates lui donnèrent un acide nouveau, l'acide lévoracémique, isomère avec l'acide tartrique, mais lévogyre; le premier forme des sels qui font toujours tourner le plan de polarisation à droite et sont hémièdres à droite; le second des sels qui possèdent également le pouvoir rotatoire, mais à gauche, et qui sont hémièdres à gauche. Quand on mêle en quantités égales les deux acides ou les sels qu'ils forment avec une même base, ils se combinent avec dégagement de chaleur, donnent de l'acide racémique ou des racémates, mais ils n'ont aucun pouvoir rotatoire, et leurs cristaux n'ont aucune hémiédrie. Deux seulement se séparent par la cristallisation : celui que nous avons cité, et le racémate double de soude et de potasse.

Si l'hémiédrie non superposable est le caractère extérieur auquel on reconnaît les substances moléculairement actives, il est naturel de penser que les substances inactives qui acquièrent le pouvoir rotatoire en cristallisant prennent aussi une forme hémiédrique. Il y avait longtemps que Herschel avait en effet remarqué que le quartz est hémièdre. Cette substance cristallise en prismes hexaèdres droits terminés par des pyramides (*fig.* 686). Or on trouve dans certains échantillons, sur trois sommets alternes a, a', a'', trois facettes plagiédrales inclinées et penchant vers la droite ou vers la gauche de l'observateur qui les regarde. Sur la pyramide opposée se trouvent trois autres facettes, mais elles aboutissent aux arêtes b, b', b'', et sont tellement disposées qu'en retournant le cristal de manière que l'observateur voie la deuxième pyramide, les trois facettes sont penchées comme les premières a, a', a''. Ce cristal est hémièdre, puisque la moitié seulement des sommets a, b, a', b',... sont tronqués, et, comme les facettes sont plus inclinées vers la droite que vers la gauche, nous dirons que c'est l'hémiédrie droite. Si maintenant nous prenons dans un miroir MN l'image du cristal O, nous aurons une deuxième forme hémièdre en O', de sens opposé et non superposable à la première. Elle se rencontre dans la nature aussi fréquemment que la première. Or Herschel a remarqué que l'hémiédrie droite entraîne le pouvoir rotatoire à droite, et l'hémiédrie gauche la rotation à gauche.

Fig. 686.



C'est en suivant ces idées que M. Marbach a découvert la rotation des

bromate et chlorate de soude, et de l'acétate d'urane et de soude. Ces cristaux sont cubiques, mais ils ont des facettes hémièdres qui répondent à des solides symétriques non superposables; ils offrent donc le caractère reconnu par M. Pasteur, et ils devaient faire tourner, comme ils font en effet tourner, le plan de polarisation, les uns à droite, les autres à gauche, suivant le sens de leurs facettes; mais si l'on fait redissoudre des cristaux de la même variété pour les laisser cristalliser de nouveau, ils reproduisent des cristaux tournant à droite avec une hémiédrie dans un sens, et d'autres qui tournent à gauche avec l'hémiédrie contraire; c'est donc un caractère qu'ils prennent en cristallisant sans qu'on sache pourquoi, et qu'ils perdent quand on les dissout.

FIN.

TABLE DES MATIÈRES.

LIVRE PREMIER.

PESANTEUR, ÉLASTICITÉ.

CHAPITRE PREMIER.

EFFETS DE LA PESANTEUR ET DE LA PRESSION SUR LES SOLIDES.

CHAPITRE II.

EFFETS DE LA PESANTEUR ET DE LA PRESSION SUR LES LIQUIDES.

CHAPITRE III.

ACTION DE LA PESANTEUR ET DE LA PRESSION SUR LES GAZ.

LIVRE II.

DE LA CHALEUR.

CHAPITRE PREMIER.

DE LA NATURE DE LA CHALEUR ET DE SA MESURE.

CHAPITRE II.

PHÉNOMÈNES PRODUITS PAR L'ÉCHAUFFEMENT DES SOLIDES ET DES LIQUIDES.

CHAPITRE III.

PHÉNOMÈNES PRODUITS PAR L'ÉCHAUFFEMENT DES GAZ.

CHAPITRE IV.

PHÉNOMÈNES OBSERVÉS PENDANT LA FUSION.

CHAPITRE V.

PHÉNOMÈNES OFFERTS PAR LA VAPORISATION.

CHAPITRE VI.

APPLICATIONS AUX PHÉNOMÈNES NATURELS ET A L'INDUSTRIE.

LIVRE III.

ÉLECTRICITÉ STATIQUE.

CHAPITRE PREMIER.

FAITS GÉNÉRAUX ; THÉORIE ET PRODUCTION DE L'ÉLECTRICITÉ.

CHAPITRE II.

MESURE DES ACTIONS ÉLECTRIQUES.

CHAPITRE III.

PHÉNOMÈNES D'INFLUENCE.

LIVRE II.

DE LA CHALEUR.

CHAPITRE PREMIER.

DE LA NATURE DE LA CHALEUR ET DE SA MESURE.

CHAPITRE II.

PHÉNOMÈNES PRODUITS PAR L'ÉCHAUFFEMENT DES SOLIDES

CHAPITRE III.

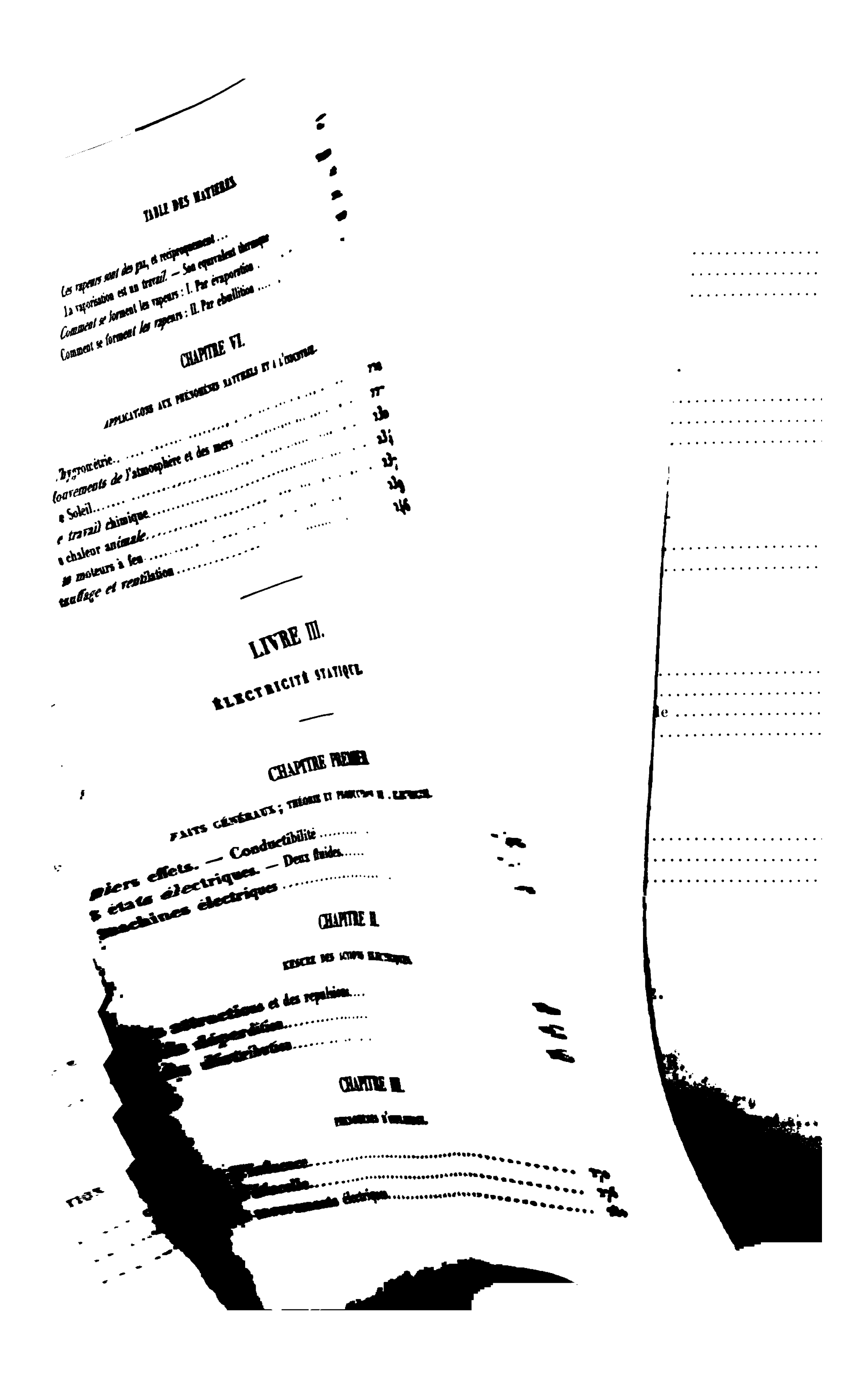
PHÉNOMÈNES PRODUITS PAR L'ÉCHAUFFEMEN

CHAPITRE IV.

PHÉNOMÈNES OBSERVÉS PENDANT L

CHAPITRE V.

PHÉNOMÈNES OFFERTS PAR LA VAPOR


TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE VI.

APPLICATIONS AUX PHÉNOMÈNES NATURELS ET À L'INDUSTRIE.

LIVRE III.

ÉLECTRICITÉ STATIQUE.

CHAPITRE PREMIER

FAITS GÉNÉRAUX ; THÉORIE ET PRODUCTION DE L'ÉLECTRICITÉ.

CHAPITRE II.

MESURE DES ACTIONS ÉLECTRIQUES.

CHAPITRE III.

PHÉNOMÈNES D'INFLUENCE.

CHAPITRE IV.

DE L'INDUCTION.

CHAPITRE V.

ÉLECTRO-GÉNÉRATEURS.

CHAPITRE VI.

MOTEURS ÉLECTRIQUES ET TÉLÉGRAPHES.

LIVRE VI.

DE L'ACOUSTIQUE.

CHAPITRE PREMIER.

DE L'ÉVALUATION NUMÉRIQUE DES SONS.

CHAPITRE II.

COMMENT SE PROPAGENT LES VIBRATIONS.

CHAPITRE III.

VIBRATIONS LONGITUDINALES.

CHAPITRE IV.

VITESSE DU SON LONGITUDINAL.

CHAPITRE V.

VIBRATIONS TRANSVERSALES.

CHAPITRE VI.

VIBRATIONS COMPOSÉES.

CHAPITRE VII.

LA VOIX ET L'OUIE.

LIVRE VII.

DE L'OPTIQUE.

CHAPITRE PREMIER.

MOUVEMENT LUMINEUX. — SA VITESSE.

CHAPITRE II.

RÉFLEXION. — RÉFRACTION. — THÉORIE ONDULATOIRE.

CHAPITRE III.

MIROIRS ET LENTILLES.

CHAPITRE IV.

INSTRUMENTS D'OPTIQUE.

CHAPITRE V.

LE SPECTRE.

CHAPITRE VI.

TRANSMISSION. — RÉFLEXION. — DIFFUSION.

CHAPITRE VII.

ÉMISSION. — ABSORPTION.

Pages.

CHAPITRE VIII.

TRANSFORMATION DES RADIATIONS.

CHAPITRE IX.

LES INTERFÉRENCES.

CHAPITRE X.

POLARISATION ET DIRECTION DES VIBRATIONS.

CHAPITRE XI.

DOUBLE RÉFRACTION UNIAXIALE.

CHAPITRE XII.

VIBRATIONS ELLIPTIQUES.

CHAPITRE XIII.

ROTATION DU PLAN DES VIBRATIONS.

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES.



